

Главный редактор:
А.А. Шегидевич, к.т.н., ректор
учреждения образования БГАА

Заместитель главного редактора:
Л.И. Гречихин, д.ф.-м.н., профессор,
профессор кафедры технической
эксплуатации авиационного и
радиоэлектронного оборудования
учреждения образования БГАА

Технический секретарь
Е.А. Шапорова, к.х.н., заведующий
кафедрой технической эксплуата-
ции воздушных судов и двигате-
лей учреждения образования
БГАА

Редколлегия
Технические науки:
С.А. Чижик, академик НАН Белору-
си, д.т.н., профессор, первый заме-
ститель Председателя Президиума
НАН Беларуси;
А.П. Ласковнѳв, академик НАН Бе-
ларуси, д.т.н., академик-секретарь
ОФТН НАН Беларуси;
В.Г. Залесский, д.ф.-м.н., директор
ФТИ НАН Беларуси;
А.Т. Волочко, профессор, доктор
технических наук, заведующий
отделом материаловедения и ли-
тейно-деформационных техноло-
гий Физико-технического института
НАН Беларуси;
Н.А. Абдужабаров, к.т.н., доцент,
декан факультета Авиакосми-
ческих технологий ТГТУ им. Ислама
Каримова, Республика Узбекистан;
А.Х. Гильмутдинов, д.ф.-м.н., профес-
сор, ректор Казанского нацио-
нального исследовательского
технического университета им. А.Н.
Туполева, Республика Татарстан;
И.В. Яцкив, д.т.н., профессор,
проректор по науке и развитию
Института транспорта и связи,
Латвийская Республика;
А.Н. Медведев, д.т.н., профессор,
декан факультета транспорта и свя-
зи Института транспорта и связи,
Латвийская Республика;
Ши-Хонг Джанг, д.т.н., профес-
сор, исполнительный секретарь
Китайского исследовательского
объединения глубокой вытяжки
металлов, КНР

Юридические науки:
О.И. Аксаментов, директор НОЧУ
ДПО «Институт воздушного и
космического права «Аэрорелл»,
Российская Федерация;
Б.П. Елисеев, д.ю.н., профессор,
ректор МГТУ ГА, Российская Феде-
рация;
Е.А. Самородова, к.ю.н., ассистент
профессора кафедры француз-
ского языка МГИМО, Российская
Федерация;
Халилов Зафиг Закир оглы, к.ю.н.,
эксперт в области правового регу-
лирования коммерческой деятель-
ности авиакомпаний, Республика
Айзербайджан;
О.А. Карпачева, начальник юри-
дического управления
ООО «АВИАХЭЛП».

Педагогические науки:
Т.В. Казак, д.п.н., профессор,
член-корреспондент Междунаро-
дной академии психологических
наук, профессор кафедры инже-
нерной психологии и эргономики
БГУИР;
Т.А. Печенева, д.пед.н., доцент, про-
фессор кафедры теории и истории
государства и права Института
управленческих кадров Академии
управления при Президенте Ре-
спублики Беларусь;
С.В. Снапковская, д.и.н, д.пед.н.,
профессор, профессор кафедры
культурологии факультета социо-
культурных коммуникаций БГУ

АВИАЦИОННЫЙ ВЕСТНИК

Научно-практический журнал

СОДЕРЖАНИЕ

АВИАЦИЯ В ЛИЦАХ

Профессор Л.И. Гречихин – 60 лет в науке. 6

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

О. Скрыпник, А. Шегидевич. Особенности рабочих зон мно-
гопозиционных систем наблюдения. 10
Л. Гречихин, А. Кириленко. Влияние срывного течения на лобовое
сопротивление шара. 17
Минг Ченг, Хонг-Ян Ган, Ши-Хонг Джанг, В. Петренко, А. Жукова,
А. Матяс. Фазовые превращения при горячей прокатке авиацион-
ного жаропрочного железо-никелевого сплава GH4169. 24
А. Капустин. Аналитическая конструкция регулятора напряжения
в соответствии с критерием обобщенной работы для авиацион-
ного бесщеточного генератора. 30
А. Наумов, М.С. Филиппова. Дефектоскопия конструкций из компози-
ционных материалаов методом шерографии. 35
В. Тузлуков. Адаптивное формирование диаграммы направленно-
сти в условиях рэлеевских замираний. 40
А. Волочко, Г. Марков, А. Ралько, В. Медведев. Резистивные нагре-
ватели для систем авионики. 58

ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

М. Петровская, А. Столяров, Д. Мягков. Психолого-педагогиче-
ские аспекты профессиональной подготовки военного авиа-
ционного специалиста. 62
Е. Самородова, И. Беляева, А. Шегидевич. Актуальность языковой под-
готовки летного состава в области международной гражданской
авиации как фактор авиационной безопасности. 66

ЮРИДИЧЕСКИЕ НАУКИ

О. Колошич. Правовое регулирование использования воздушного
пространства Республики Беларусь. 72
О. Карпачѳва. Юридические аспекты операций EXCHANGE авиа-
ционно-технического имущества. 78

Зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь
№1951 от 20 декабря 2019 года.

Учреждение образования
БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ АВИАЦИИ

Республика Беларусь, 220096, г. Минск, ул. Уборевича, 77
Тел. +375 (17) 341 94 22, факс (017) 341 66 32
academy@bsaa.by
www.bgaa.by

THE AVIATION HERALD

Scientific and practical journal

CONTENTS

AVIATION IN PERSONS

Professor L. I. Grechikhin – 60 years in science. 6

TECHNICAL SCIENCES

O. Skrypnik, A. Shegidevich. Features of working areas of multilateration
systems. 10
L. Grechihin, A. Kirilenko. The effect of separated flow on frontal ball
resistance. 17
Ming Cheng, Hong-Yan Gan, Shi-Hong Zang, V. Petrenko, A. Zhukova,
A. Matyas. Phase transformations during hot rolling of aviation heat-
resistant iron-nickel alloy GH4169. 24
A. Kapustin. Analytical design of a voltage regulator according
to the criterion of the generalized work for aircraft brushless
generator. 30
A. Naumov, M. Filippova. Defectoscopy of constructions from composite
materials by scheography method. 35
V. Tyzlykov. Adaptive formation of direction diagram under Rayleigh
fading. 40
A. Volochko, G. Markov, A. Ralko, V. Medvedev. Resistive heaters for
avionics systems. 58

PEDAGOGICAL SCIENCES

M. Petrovskaya, A. Stolyarov, D. Myagkov. Psychological and
pedagogical aspects of professional training of a military aviation
specialist. 62
E. Samorodova, I. Belyaeva, A. Shegidevich. Importance of foreign
language communicative competence formation of international civil
aviation flight personnel as aviation safety factor. 66

LEGAL SCIENCES

O. Koloshich. Legal regulation of airspace using of the Republic of
Belarus. 72
O. Karpacheva. Legal aspects of EXCHANGE operations of aeronautical
property. 78

Educational establishment
BELARUSIAN STATE ACADEMY OF AVIATION

220096, Minsk, Uborevich St., 77
Tel. +375 (17) 341 94 22, fax (017) 341 66 32
academy@bsaa.by
www.bgaa.by

Колонка главного редактора



Шегидевич
Артѳм Артурович

Ректор
Белорусской
государственной
академии авиации

Дорогие друзья,
уважаемые читатели!

Мы рады презентовать вам сегодня новое уникальное для Республики Беларусь издание – первый научно-практический журнал авиационной отрасли! В нем вы найдете отражение последних достижений, новаций, исследований, решение практических и теоритических задач авиации нашей страны. Отрадно то, что идея его создания принадлежит alma matter авиаторов Беларуси – Белорусской государственной академии авиации. Совсем недавно наша академия отметила своё 45-летие, а серьёзный возраст ставит перед нами серьёзные задачи. Этот журнал – не только их реализация, но и проводник к грядущим свершениям, вектор в дальнейшем развитии. Я искренне надеюсь, что страницы этого издания станут квинт-эссенцией передового опыта и научных достижений, сочетая в себе мнение ведущих экспертов и практиков, научные дискуссии и презентации перспективных разработок.

Желаю читателям и авторам «Авиационного вестника» творческих успехов, профессионального развития, неиссякаемой энергии и удачи в этой сложной и кропотливой работе. Никогда не останавливайтесь на достигнутом, смело двигайтесь вперед к новым достижениям и открытиям!

Верстка, дизайн:
О.М. Борздова, магистр тех. наук,
начальник редакционно-издательского отдела учреждения
образования БГАА



Уважаемые читатели!

Выход в свет первого номера журнала «Авиационный вестник», несомненно, можно отнести к важным, и даже в определённой степени историческим событиям. Впервые в истории нашей страны в информационном пространстве появилось издание, специализирующееся на продвижении научных разработок в сфере авиации и смежных отраслей, а также решении различных практических вопросов организации и обеспечения воздушных перевозок в контексте основных мировых трендов. Учитывая особую роль авиации среди современных видов транспорта, актуальные задачи наращивания темпов роста авиационной отрасли, динамику и перспективы развития авиапредприятий Республики Беларусь можно без преувеличения сказать, что материалы «Авиационного вестника» будут очень востребованы как в научной среде, так и среди специалистов реального сектора экономики. Немаловажно то обстоятельство, что редак-

ционная коллегия журнала включает в себя высококвалифицированных специалистов из разных государств, а редакционная политика направлена на интеграцию отечественных научных школ в международное научное и образовательное пространство, развитие отечественных исследований во взаимосвязи с лучшими достижениями зарубежных учёных и авиаспециалистов. Полагаю, что это позволит сделать материалы журнала максимально актуальными, а их авторы внесут свой значимый вклад в инновационное развитие воздушного транспорта Республики Беларусь.

Пусть первый в нашей стране научно-практический журнал об авиации займёт достойное место среди ведомственных изданий Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь и будет радовать читателей интересными и содержательными статьями!

Авраменко Алексей Николаевич
Министр транспорта и коммуникаций Республики Беларусь



Уважаемые коллеги!

Именно так, на мой взгляд, я могу обратиться к читателям журнала «Авиационный вестник», первый номер которого Вы держите сейчас в руках. Уверен, что такое издание жизненно необходимо в первую очередь профессиональному сообществу работников авиационной отрасли, тем специалистам, кто в своей повседневной деятельности решает широкий спектр теоретических и практических задач, связанных с развитием авиации в Республике Беларусь. Мы с Вами впервые получили долгожданную возможность презентовать в специализированном отраслевом издании перспективные разработки, проекты, исследования, в рамках которых решаются проблемы повышения эффективности и безопасности воздушных перевозок, модернизации авиационной техники, материалов и оборудования, развития образовательной и производственной инфраструктуры нашей отрасли. Полагаю, что обсуждение существующих задач и их решений, научные дискуссии, выступления экспертов на страницах журнала явятся одним из ключевых факторов, определяющих пути дальнейшего совершенствования работы авиационной отрасли.

Желаю редакционной коллегии, авторам и читателям «Авиационного вестника» творческих успехов, новых профессиональных достижений и удачи в нашей дальнейшей совместной работе!

Сикорский Артем Игоревич
Директор департамента по авиации Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь

Дорогие друзья!

Рождение нового периодического издания, предназначенного для публикации результатов теоретических и прикладных научных исследований, всегда является значимым событием, вызывающим большой общественный резонанс и пристальное внимание со стороны научного сообщества. Все, кто в своё время прошёл полный сложностей путь от осознания потребности в создании постоянной площадки для обсуждения определённой актуальной проблематики до регистрации и выхода в свет полноформатного издания и формирования качественного редакционного «портфеля», понимают насколько это ответственное и важное решение. Я хочу от всей души поздравить специалистов авиационной отрасли с тем, что такое решение принято, проделана большая подготовительная работа и опубликован первый номер «Авиационного вестника». Думаю, что данный журнал станет новой площадкой для апробации инновационных идей, которые дадут новый импульс развитию отечественной авиации. Для этого, на наш взгляд, есть все необходимые предпосылки. В стенах Белорусской государственной академии авиации формируются актуальные научные направления, в рамках международного сотрудничества разрабатываются и реализуются совместные проекты с зарубежными центрами подготовки авиационных специалистов.

Желаю Вам плодотворного научного творчества, тесно связанного с потребностями и повседневной жизнью авиационных предприятий нашей страны! Успехов и новых достижений в профессиональной деятельности!

Чижик Сергей Антонович
Первый заместитель Председателя Президиума НАН Беларуси



Дорогие друзья!

Авиация, которая стала для нас делом всей жизни, объединяет людей, страны, континенты и является олицетворением профессиональных усилий тысяч работников авиапредприятий нашей страны. Их многолетний опыт, идеи, знания всегда были и остаются бесценным капиталом, который необходимо преумножать, обеспечивая поступательное движение вперёд по пути прогресса, сохраняя общую заинтересованность в динамичном развитии авиационной отрасли и единство в достижении этой цели. Нам всегда есть, что обсудить друг с другом, работая на перспективу. Полагаю, что появление «Авиационного вестника», первого специализированного журнала для работников авиации, привносит в нашу профессиональную деятельность дополнительные стимулы и возможности для сотрудничества, обмена опытом, генерирования новых идей. Мне приятно видеть на страницах журнала фамилии людей, с которыми я знаком по совместной работе, либо встречался на площадках различных форумов, конференций, совещаний. Надеюсь, что редакционной коллегии и авторам удастся сделать «Авиационный вестник» удачным научным проектом, востребованность которого среди работников авиационной отрасли с каждым годом будет только возрастать, а апробированные в научных публикациях идеи найдут применение на практике! Желаю всем интересных идей и плодотворного сотрудничества!

Чуро Леонид Николаевич
Генеральный директор государственного предприятия «Белэрознавигация»



Профессор Л.И. Гречихин – 60 лет в науке



Я, Гречихин Леонид Иванович, родился в семье рабочего в 1929 году в городе Алчевске Луганской округи. В войну находился в оккупации и видел все то безобразие, которое творили оккупанты. После освобождения я понял насколько важно обладать знаниями и поэтому в школе я учился только на отлично. После окончания средней школы я поступил во Львовский университет им. Ив. Франко на физико-математический факультет физического отделения. В 1954 г. я оказался первым выпускником физического факультета, получив базовое образование — физика.

Лекции нам читали известные на то время профессора. К учебе я относился добросовестно и уже на четвертом курсе выполнил курсовую работу «Рассеяние света в мутных средах». Получил первый научный результат: как коэффициенты рассеяния и отражения зависят от произвольной индикатрисы рассеяния в мутных средах.

Преддипломную практику проходил на заводе «Азовсталь» г. Мариуполь. На заводе возникла проблема, как методами спектрального анализа контролировать концентрацию фосфора при плавке металла на базе керченских фосфористых руд. Я месяц практики занимался этой проблемой. Проблема была решена. Мне предложили дипломную работу представить на эту тему. Но задача была решена, и заниматься ею уже было не интересно. Меня

больше интересовала теоретическая физика, и я решил дипломную работу выполнять на кафедре теоретической физики. Профессор В. С. Миляничук поставил мне задачу произвести расчет вероятностей возникновения запрещенных переходов под влиянием неоднородных электрических полей на пространстве атома. Пришлось самостоятельно глубоко изучить квантовую механику, что, впоследствии, мне эти знания постоянно приходилось использовать на практике. Поставленная задача была решена чисто теоретически без конкретного приложения. У меня остался неприятный осадок, что выполненная работа является «наука для науки». Сейчас это звучит иначе — фундаментальная наука. С таким скромным научным багажом началась моя практическая деятельность на ниве преподавателя курса общей физики технического ВУЗа.

Высшее военное учебное заведение «Минское высшее инженерное зенитное ракетное училище» было только организовано и пришлось создавать лабораторную базу с нуля. Было не до научной работы. Посоветовали мне поступить в аспирантуру. Я узнал, что в педагогическом институте аспирантами будет руководить Ельяшевич М. А. Я сдавал экзамен по спектроскопии, используя его книгу «Редкие земли», и поэтому решил пойти к нему в аспирантуру. Сдал вступительные экзамены и узнаю, что М. А. Ельяшевич руководить аспирантами не будет. Тогда я подался в Институт физики, где М. А. Ельяшевич руководил созданной им лабораторией «Радиоспектроскопии». В аспирантуру поступить не удалось, а на работу меня взяли, но не в существующую лабораторию, а во вновь создаваемую лабораторию «Высокотемпературной оптики». Сыграло то обстоятельство, что после окончания университета «Лаврентий Павлович Берия» мне дал 1-ю форму допуска к закрытым работам. Такая форма допуска позволяла мне бывать во всех организациях, которые занимались ядерной физикой и ракетной техникой.

Итак, в 1959 г. я стал работать в Институте физики и заниматься под руководством М. А. Ельяшевича разработкой спектроскопических методов диагностики низкотемпературной плазмы. Здесь мои знания, приобретенные в процессе выполнения дипломной работы, оказались востребованными. Разработанные мною спектроскопические методы находили применение во многих областях техники. По первым 25 работам я защищаю кандидатскую диссертацию «Разработка спектроскопических методов диагностики плазменных и ионных двигателей» в 1963 г. После защиты кандидатской диссертации начались мои мытарства на ниве науки, как физика. Мне, как физику, было абсолютно не важно, чем заниматься. Какой только работой мне пришлось не заниматься?

В 1959 г. С. П. Королев начал подготовку полета человека в космос. Возникли проблемы. При вхождении в плотные слои атмосферы с высот 80 км и до высот 20 км обрывается радиосвязь. Пока не ясно в чем дело, человека в космос посылать нельзя. М. А. Ельяшевичу, как известному спектроскописту, ставится задача разобраться, в чем дело. Я оказался со своими спектроскопическими методами к стати. Началась интенсивная работа с неограниченными средствами и уже через 1,5 года выяснили, в чем дело. При горении теплозащитного покрытия возникает двойной электрический слой с параметрами плазмы дугового разряда. Стало ясно, как осуществить непрерывную радиосвязь. Для полета человека в космос дорога открыта!

Возникла новая проблема. Надо создать карту обратной стороны Луны. Но в этом случае возвращаться на Землю надо уже со второй космической скоростью. Какое теплозащитное покрытие надо применить, чтобы сохранился спускаемый аппарат? В это время уже появились лазеры. Опять нам была поставлена задача — выяснить все и в деталях. В Институте оружия ближнего боя изготовили первые лазеры на неодимовом стекле. Я еду в

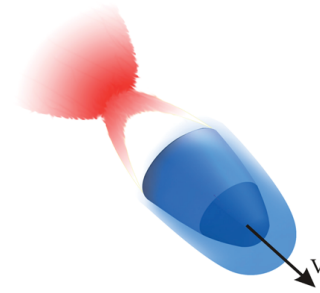


Рис.1. «Эффект Гречихина»

этот институт и прошу дать мне самый мощный лазер. Мне подобрали лазер, который прожигал советский пятак. Опять началась интенсивная работа. В результате было показано, что существующая теплозащита сторит меньше при второй космической скорости вхождения, чем при первой. После наших убедительных докладов с академиком АН БССР М. А. Ельяшевичем, С. П. Королев (на свой страх и риск) принимает решение — осуществить запуск спутника к Луне и сфотографировать обратную ее сторону не разрабатывая нового теплозащитного покрытия. После замера толщины сгоревшей части покрытия оказалось, что наше предвидение оправдалось. Мне было предложено оформить докторскую диссертацию на эту тему. Я отказался в связи с тем, что меня волновали редкие случаи обрыва связи со спутниками. Были в это время получены данные по мощному излучению поверхности Земли в ультрафиолетовой области спектра в зоне тени. Я нашел решение, и надо было доводить это до логического завершения. Сделать открытие — это не докторская диссертация. В чем оказалась причина?

«Эффект Гречихина». При полетах искусственных спутников Земли в режиме свободно-молекулярного обтекания, вследствие образования на поверхности отрицательных ионов кислорода и их уноса с поверхности в лобовой части возникает фиолетово-голубое свечение, а в тыльной стороне возбуждаются запрещенные линии кислорода ярко красного цвета. Первое общее обоснование явления было выполнено в 1969 г. В 1971 г. при аварийном спуске ИСЗ «Союз-10» ночью космонавты впервые увидели этот эффект, а экспериментальные измерения

были выполнены в 1974 г на долговременной орбитальной станции «Салют-4».

В 1974 г. успешно защищаю докторскую диссертацию «Разделение электрических зарядов на поверхности твердого тела». В результате большой оппозиции в ВАКе 5-ть лет утверждали и добились того, что я отказался от докторской степени. Только после смерти Брежнева по совету лауреата Нобелевской премии, академика А. М. Прохорова я представил закрытую диссертацию «Неравновесное оптическое излучение воздушных и космических летательных аппаратов» в 1986 г. Тем не менее, пришлось диссертацию снимать с защиты, переделывать оппонентов, оппонирующую организацию, вводить в совет дополнительных специалистов. Только после этого состоялась защита и в ВАКе вынуждены были утвердить за 1,5 месяца, а профессора мне присвоили только через 12 лет после получения докторского диплома, имея написанный курс общей физики для технических ВУЗов в конспективном изложении. Диссертация и сейчас представляет интерес для развития космической техники. Гриф секретности был снят только через 8-ь лет, когда уже в США этот эффект достаточно глубоко был изучен спустя 10-ть лет после нас, но с более совершенной аппаратурой и с более полным подтверждением выполненными мною в 1969 г. теоретических расчетов.

Очень интересный и драматичный период для меня был на протяжении 1963-1976 гг., когда создавалась система раннего предупреждения о ракетном нападении. В 1963 г. я, молодой кандидат наук, на коллегии Министерства оборонной промышленности выступаю с докладом о возможном обнаружении старта ракет. Только через два года принимается решение о создании такой системы. Где-то в 1976 г. система уже на выходе, а не ясно какие лучистые потоки от стартовых ракет возникают на разных высотах полета и какими приемниками их регистрировать уже созданной аппаратурой. Я в пожарном порядке делаю прикладные расчеты и еду на Второй московский электроламповый завод, который изготавливает приемники инфракрасного излучения. С директором обсуждали, какие усовершенствования

необходимо внести, чтобы такие приемники можно было использовать в космосе практически. В результате система запущена. Но! Один за другим спутники вылетают со строя. Почему? Выясняю, что возникает мощная электризация. Учили это, и по сей день система эксплуатируется. Слава богу! А какое было для меня величайшее нервное напряжение! Такова роль «лидера». Если получен положительный эффект, то о «лидере» все забывали, а если отрицательный эффект, то виноват «лидер». В советское время бытовала следующая оценка научной работы: «Не важно, кто сказал, а важно кто сделал».

При полетах самолетов происходит их электризация. Почему она происходит и какие возникают при этом явления? Ранее полагали, что вследствие трения о воздух происходит электризация. Оказалось, что все определяется работой двигателей. Это приводит к неравновесному излучению самолетного факела в ультрафиолетовой области и к радиоизлучению в длинноволновой области. Практическое применение весьма разнообразное от обнаружения до технической диагностики.

Начиная с 1990 г. и по настоящее время я непрерывно занимаюсь наночастицами и нанотехнологиями. Знания мои по квантовой механике тут оказались вновь к стати. Разработана двухчастичная квантовая механика, разработан метод расчета ионной связи, метод расчета наведенной связи, разработан метод расчета встроенных электрических моментов атомов и ионов, что позволяет производить расчеты энергий связи в молекулах и в кластерных образованиях, а также физической и химической адгезии. В этом направлении опубликовано 2 монографии, 2 брошюры, более 50-ти научных статей и патентов. Сделано интересное открытие — в природе искусственно создаются плотноупакованные структуры, т.е. это 5-е агрегатное состояние. В этом состоянии материалы обладают сверхтвердостью, огромными модулями Юнга, сверхпроводимостью, способны создавать большие магнитные домены, не проводят тепло, зеркально отражают электромагнитное излучение. При ударном воздействии и под действием звука такие структуры эффективно разрушаются.

В этом направлении мне очень приятно сотрудничать с кафедрой «Строительства шахт и подземных сооружений» ДонНТУ, где эта наука востребована. По циклу выполненных работ в направлении совершенствования взрывных строительных технологий меня избирают иностранным академиком «Академии строительства Украины».

Накануне запуска в СССР «Бурана» возникла проблема расчета газодинамического сверхзвукового обтекания тел сложной формы. Меня попросили в пожарном порядке произвести такой расчет. Понимая, что это важно и престижно, такой метод разрабатывается, и мы получаем полную картину обтекания «Бурана». Вся программа прошла благополучно. Сейчас я столкнулся с дозвуковым обтеканием. Какой кошмар! Мы пользуемся теориями, которые разработаны применительно к воде в 18 – 19 веке. Всю эту механику переносим на полет самолета. Самолет – это открытая система. К ней нельзя применять законы сохранения, которые получены для закрытых систем. Даже сам Жуковский – отец русской авиации – в свое время отказался использовать свою же теорию для конструирования самолетов и предложил для этих целей использовать экспериментальную аэродинамику. В результате летный состав обучается на неверной физике, а как следствие все аварии происходят за счет «человеческого фактора». Пришлось разрабатывать основы дозвуковой аэродинамики. Цикл выполненных работ в этом направлении изложен в книге «Аэродинамика летательных аппаратов».

Сегодня остро встал вопрос энергоэффективности. Приходится заниматься и этими проблемами. В этом направлении опубликована одна монография «Двигатели внутреннего сгорания. Физические основы технической диагностики и оптимального управления». Выход из создавшегося критического состояния могут нас вывести тепловые насосы. Сейчас с моим участием создаются экспериментальные образцы, оформляются патенты и разрабатываются новые теории. Этот цикл работ опубликован в книге «Энергетические комплексы на транспорте».

На ниве науки у меня был очень интересный эпизод. В 1962 г.

со Штатами договорились о прекращении испытаний ядерных зарядов в атмосфере Земли. Накануне подписания договора американцы начали высотные испытания. Мы в срочном порядке тоже начали испытания. Меня включают в состав государственной комиссии по проведению испытаний, и было сказано «Есжай, смотри и думай». Закончилась для меня задача «смотреть и думать» тем, что на севере возникают полярные сияния, которые противоракетные комплексы воспринимают как летящие ракеты. Тогда я предложил, идентифицировать полярные сияния, которые я наблюдал при высотных ядерных взрывах и их анализировал. Таким образом, я, как мне было сказано, «Закрыв Север». Это была очень и очень серьезная проблема.

В Республике Беларусь небольшая группа авиаторов предложила использовать замкнутое крыло для самолетов. Был изготовлен самолет и проведены летные испытания. Результаты оказались настолько шокирующими, что возникла необходимость в серьезном научном обосновании. Обратились ко мне заняться этой проблемой. На протяжении года мною было создано программное обеспечение и проведено компьютерное моделирование. Полученные результаты были подтверждены на аэродинамической трубе в Республике Сербия. К сожалению, как всегда, все перекладывается на личную инициативу.

В последнее время я вновь обратился к отрицательным ионам. В результате разработан метод расчета величины сродства к электрону атомов и молекул. Это позволило обосновать, почему катодные факелы в продольном магнитном поле не подчиняются закону Ампера и дать правильную трактовку возникновения p - и n -проводимости, а также p - n перехода. Обосновано фундаментальное открытие: низкотемпературная плазма есть результат ионизации отрицательных ионов. Во всех случаях плазма образуется с двугорбым распределением электронного газа по энергиям. Максимальная энергия определяется электронным ударом по формуле, которая была получена при моем участии теоретически в 1970 г. и экспериментально доказана, а минимальная энергия – протеканием разного рода хи-

мических реакций с распадом отрицательных ионов.

Моя научная и педагогическая работа отмечена правительственными наградами: орденом «Трудовое красное знамя», медалью «За трудовую доблесть», медалью «Ветеран труда», юбилейной медалью «75-ти летия Ульяновского ВАУ ГА», лауреат НТТМ, лауреат медали «Архимед» Республики Сербия.

Являюсь членом редакционной коллегии научного журнала «Проблемы инфокоммуникаций» Республика Беларусь, членом редакционной коллегии журнала «Воентехнический вестник Министерства обороны Республика Сербия» по приказу Министра обороны Республики Сербия. Вхожу в редакционный совет международного журнала «Scientific Technical Review» Сербия. В США вхожу в редакционный совет научных журналов «American Journal of Applied Scientific Research», «Engineering and Technology», «International Journal of Engineering Technology Scientific Innovation».

Мне в жизни повезло общаться со многими видными академиками, профессорами и научными работниками, которые в своих исследованиях получали новые научные открытия.

Мне постоянно приходилось и приходится заниматься практически важными проблемами. Полученные результаты являются весьма значимыми и нужными, а для практики крайне необходимыми.

Материал подготовлен из интервью техническим секретарем журнала "Авиационный вестник" к.х.н. Шапоровой Е.А.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 621.396.96

О. СКРЫПНИК, А. ШЕГИДЕВИЧ

ОСОБЕННОСТИ РАБОЧИХ ЗОН МНОГОПОЗИЦИОННЫХ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЯ

Олег Николаевич Скрыпник – профессор, академик Российской академии естествознания, доктор технических наук, профессор кафедры авиационного радиоэлектронного оборудования Иркутского филиала МГТУ ГА, Российская Федерация
skripnikon@yandex.ru

Артём Артурович Шегидевич – кандидат технических наук, ректор учреждения образования БГАА, Республика Беларусь
sh.a.bgaa@tut.by

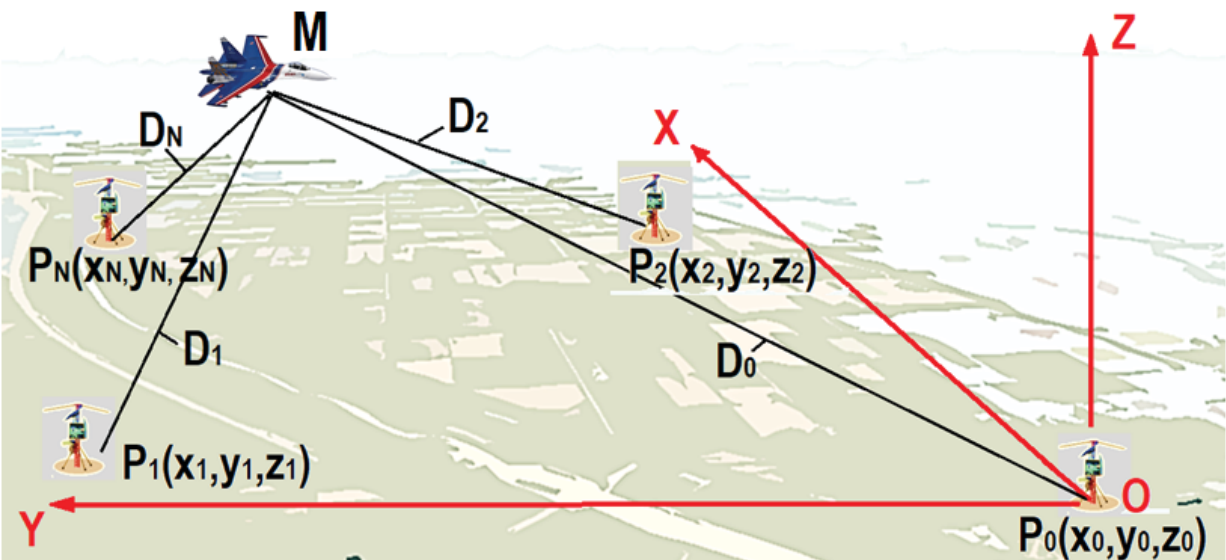


Рис.1. Взаимодействие ответчика ВС со станциями МПЧН

ответчик ВС, и сеть разнесенных приемников. При этом пространственное положение ВС определяется в точке пересечения двух или более поверхностей положения, представляющих собой поверхности равных разностей расстояний (гиперboloиды).

Для реализации разностно-дальномерного метода необходимо иметь сеть территориально-распределенных наземных станций, координаты которых известны в заданной системе координат, и измерять разности моментов приема ими сигналов от бортовых ответчиков. Одна из станций является центральной (Master Station (MS)) и относительно момента приема на ней сигнала от бортового ответчика ВС фиксируются моменты приема этого же сигнала всеми остальными приемными станциями. Обработка полученных таким образом разностей моментов приема сигналов (TDOA – Time Difference of Arrival) позволяет найти разности расстояний, а по ним решить задачу вычисления координат ВС. Обработка TDOA для решения задачи позиционирования осуществляется в MLAT-контроллере, который может находиться на центральной станции или на командно-диспетчерском пункте.

Аэродромные МПЧН являются компонентом систем A-SMGCS (Advanced Surface Movement Guidance and Control Systems) [4] и предназначены для наблюдения

за ВС на этапах посадки и при движении на аэродроме, обеспечивая повышение эффективности и безопасности выполнения данных операций в условиях высокой плотности воздушного и аэродромного движения. Широкозонные МПЧН (Wide Area MLAT (WAM)), кроме того, используются для наблюдения за ВС на воздушных трассах и в зонах подхода.

Известны работы, в которых рассмотрены различные варианты архитектур МПЧН и их влияние на характеристики системы [5-10]. Цель данной работы состоит в исследовании влияния на характеристики поля наблюдения (рабочей зоны) МПЧН как архитектуры системы, так и высоты полета ВС.

Особенности решения навигационной задачи в МПЧН и методика исследований

Пусть ВС, бортовой ответчик которого излучает ответный сигнал, расположено в точке M (рис.1). Положение ВС в прямоугольной системе координат OXYZ, начало которой совпадает с позицией P₀ MS, характеризуется вектором $\vec{M} = \{x, y, z\}$.

Сигнал ответа от ВС принимается N+1 приемниками системы МПЧН, расположенными в точках P₀, P₁, ..., P_i, ..., P_N с известными координатами.

Положение некоторого i-го приемника (его антенны) характеризуется вектором координат

$$\vec{P}_i = \{x_i, y_i, z_i\}, \quad 0 \leq i \leq N+1$$

Дальность от ответчика (ВС) до i-го приемника в прямоугольной системе координат OXYZ определяется выражением

$$D_i = |\vec{P}_i - \vec{M}| = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \quad (1)$$

Дальность от ВС до антенны приемника MS определяется выражением

$$D_0 = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (2)$$

где x, y, z – координаты ВС в выбранной системе координат.

Дальность D_i в выражении (1) определяется выражением $D_i = cT_i$, где c – скорость распространения радиоволны, T_i – время распространения сигнала от ответчика ВС до i-го наземного приемника МПЧН. В МПЧН при этом выполняются измерения разностей $\Delta T_{i0} = T_i - T_0$ момен-

Современные концепции организации воздушного движения (ОрВД), позволяющие повысить эффективность использования воздушного пространства (ВП) в условиях высокой плотности и интенсивности воздушного движения, основываются на создании высокоточных и надежных навигационно-временного поля и поля наблюдения. Традиционные средства радиолокационного контроля ВП не в полной мере удовлетворяют указанным требованиям. В качестве эффективного средства, позволяющего решить задачи в соответствии с современными технологиями ОрВД, предполагается использовать многопозиционные системы наблюдения (МПЧН) [1].

МПЧН (англ. – Multilateration systems (MLAT)) предназначены для определения координат подвижных объектов (воздушных судов (ВС), аэродромных средств), оборудованных средствами излу-

чения импульсных радиосигналов. В основе работы МПЧН лежит принцип мультилатерации, который используется в широко известных импульсно-фазовых разностно-дальномерных системах дальней навигации (РСДН) Чайка (Россия) и Loran-C (США) [2].

Технологии МПЧН позволяют повысить эффективность наблюдения (англ. – surveillance) в условиях, когда создаваемое другими техническими средствами поле наблюдения по точности, надежности, размерам и конфигурации, затратам на создание не обеспечивает решение задач ОрВД на требуемом современном уровне. Поэтому МПЧН может использоваться как дополнительный или альтернативный источник данных наблюдения в целях обеспечения ОрВД, включая функции системы контроля за безопасностью полетов, выполнение которых в настоящее время обеспечивается средствами вторичной обзорной

радиолокации (ВОРЛ).

МПЧН, как техническая система, представляет собой средство вторичной радиолокации, в котором координаты ВС измеряются разностно-дальномерным методом с помощью станций, расположенных на земле. Разностно-дальномерный метод определения местоположения называется также мультилатерационным методом, что и послужило причиной наименования системы как MLAT [3]. В МПЧН координаты ВС определяются на земле, поэтому решение задачи позиционирования ВС не зависит от каких-либо специальных бортовых средств навигации – необходим лишь бортовой ответчик системы ВОРЛ.

С радионавигационной точки зрения МПЧН является обращенной разностно-дальномерной системой. В отличие от классического разностно-дальномерного метода здесь используется один источник излучения сигнала –

тов приема сигналов парами наземных станций (TDOA-измерения), где T_0 — момент приема сигнала от ВС на MS .

Тогда разность расстояний от ВС до пары приемников, расположенных в точках P_0 и P_i , можно записать в виде

$$\Delta D_{i0} = c\Delta T_{i0} = cT_i - cT_0 = D_i - D_0 \quad (3)$$

При использовании четырех приемных станций МПЧН ($i = 3$) можно получить систему из трех нелинейных уравнений вида (3) с тремя неизвестными — координатами ВС (x, y, z). При решении этой системы уравнений получим координаты ВС (ответчика) в реальном времени.

Для оценки влияния на точность позиционирования ВС его положения относительно приемных станций МПЧН, так же как и в спутниковых радионавигационных системах, используется понятие геометрического фактора (ГФ) — *Geometric Dilution of Precision (GDOP)* или *DOP* [2, 3].

Выражение для *GDOP* можно получить путем разложения (3) в ряд Тейлора в окрестности истинных значений координат ВС x^0, y^0, z^0 . Ограничиваясь линейными членами ряда, получим

$$\delta D_{i0} = \frac{\partial D_i}{\partial x} \bigg|_{x=x^0, y=y^0, z=z^0} \delta x + \frac{\partial D_i}{\partial y} \bigg|_{x=x^0, y=y^0, z=z^0} \delta y + \frac{\partial D_i}{\partial z} \bigg|_{x=x^0, y=y^0, z=z^0} \delta z + \frac{\partial D_0}{\partial x} \bigg|_{x=x^0, y=y^0, z=z^0} \delta x - \frac{\partial D_0}{\partial y} \bigg|_{x=x^0, y=y^0, z=z^0} \delta y - \frac{\partial D_0}{\partial z} \bigg|_{x=x^0, y=y^0, z=z^0} \delta z \quad (4)$$

где δD_{i0} — погрешность измерения разности дальностей от ВС до i -й и опорной станций; x^0, y^0, z^0 — истинные координаты ВС; $\delta x, \delta y, \delta z$ — погрешности определения координат ВС.

Взяв частные производные, после группировки подобных членов выражение (4) приведем к виду

$$\delta D_{i0} = \left(\frac{x^0 - x_i}{D_i} - \frac{x^0 - x_0}{D_0} \right) \delta x + \left(\frac{y^0 - y_i}{D_i} - \frac{y^0 - y_0}{D_0} \right) \delta y + \left(\frac{z^0 - z_i}{D_i} - \frac{z^0 - z_0}{D_0} \right) \delta z \quad (5)$$

Поскольку для определения координат ВС в МПЧН необходимо измерить разности дальностей как минимум до трех пар станций, введем вектор $\delta \bar{Z}^T = [\delta D_{10}, \delta D_{20}, \delta D_{30}]$, включающий погрешности измерения разностей дальностей до MS и каждой из трех приемных станций.

Введем вектор $\delta \bar{X}^T = [\delta x, \delta y, \delta z]$, включающий погрешности измерения координат ВС. Тогда систему из трех уравнений вида (5) для погрешностей *TDOA* измерений в МПЧН можно записать в векторно-матричном виде как

$$\delta \bar{Z} = H \delta \bar{X} \quad (6)$$

где H — матрица направляющих косинусов линий дальностей «наземный приемник МПЧН — ВС» в системе координат $OXYZ$, которая имеет вид

$$H = \begin{bmatrix} \frac{x^0 - x_1}{D_1} - \frac{x^0 - x_0}{D_0} & \frac{y^0 - y_1}{D_1} - \frac{y^0 - y_0}{D_0} & \frac{z^0 - z_1}{D_1} - \frac{z^0 - z_0}{D_0} \\ \frac{x^0 - x_2}{D_2} - \frac{x^0 - x_0}{D_0} & \frac{y^0 - y_2}{D_2} - \frac{y^0 - y_0}{D_0} & \frac{z^0 - z_2}{D_2} - \frac{z^0 - z_0}{D_0} \\ \frac{x^0 - x_3}{D_3} - \frac{x^0 - x_0}{D_0} & \frac{y^0 - y_3}{D_3} - \frac{y^0 - y_0}{D_0} & \frac{z^0 - z_3}{D_3} - \frac{z^0 - z_0}{D_0} \end{bmatrix}$$

Из выражения (6) может быть найдена матрица дисперсий погрешностей измерения разностей дальностей $D_{\delta \bar{Z}} = D\{\delta \bar{Z}\} = M\{\delta \bar{Z} \cdot \delta \bar{Z}^T\}$, где T — символ транспонирования, $M\{\cdot\}$ — символ операции математического ожидания. С учетом правил транспонирования получим

$$\begin{aligned} D_{\delta \bar{Z}} &= M\{H \delta \bar{X} \cdot \delta \bar{X}^T H^T\} \\ &= HM\{\delta \bar{X} \cdot \delta \bar{X}^T\}H^T \\ &= HD_{\delta \bar{X}}H^T \end{aligned}$$

Отсюда находим матрицу дисперсий погрешностей позиционирования ВС

$$D_{\delta \bar{X}} = H^{-1} D_{\delta \bar{Z}} (H^T)^{-1}$$

где (-1) — символ операции обращения матрицы.

Полагая измерения *TDOA* равноточными

$$(\sigma_{\delta D_{10}} = \sigma_{\delta D_{20}} = \sigma_{\delta D_{30}} = \sigma_{\delta D_{40}} = \sigma_{\delta \Delta D})$$

получим

$$\begin{aligned} D_{\delta \bar{X}} &= H^{-1} (H^T)^{-1} \sigma_{\delta \Delta D}^2 \\ &= (H^T H)^{-1} \sigma_{\delta \Delta D}^2 \end{aligned}$$

Точность позиционирования ВС можно определить как сумму диагональных элементов матрицы $D_{\delta \bar{X}}$. Тогда

$$\begin{aligned} \sigma_{\delta x}^2 + \sigma_{\delta y}^2 + \sigma_{\delta z}^2 &= \text{tr}((H^T H)^{-1}) \sigma_{\delta \Delta D}^2 \quad (6) \\ &= GDOP \cdot \sigma_{\delta \Delta D}^2 \end{aligned}$$

где $GDOP = \sqrt{\text{tr}((H^T H)^{-1})}$ — коэффициент, устанавливающий зависимость между дисперсией погрешности позиционирования ВС и дисперсией погрешности измерения разности дальностей до ВС $\sigma_{\delta \Delta D}^2$.

Различают следующие составляющие *GDOP* для МПЧН:

- *горизонтальный (HDOP)* — характеризует точность определения местоположения ВС в горизонтальной плоскости;
- *вертикальный (VDOP)* — характеризует точность определения положения ВС в вертикальной плоскости;
- *пространственный (PDOP)* — характеризует точность

определения положения ВС в пространстве.

Как следует из (6) значение *GDOP* (или его составляющих) оказывают существенное влияние на точность позиционирования ВС. Так, точность определения горизонтальных координат ВС будет зависеть от величины горизонтального геометрического фактора *HDOP*, а точность определения высоты — от величины вертикального геометрического фактора *VDOP*.

Для оценки возможностей применения МПЧН важное значение имеют характеристики поля наблюдения в пределах рабочей зоны системы. Под рабочей зоной МПЧН будем понимать область в горизонтальной плоскости (поле точности), в пределах которой точность позиционирования ВС будет не хуже заданной. При этом вместо поля точности позиционирования ВС будем рассматривать поле распределения значений горизонтального *HDOP* и вертикального *VDOP* геометрических факторов. Саму рабочую зону будем характеризовать такими параметрами, как ее конфигурация и размер (площадь).

Результаты исследований и их обсуждение

Исследования характеристик МПЧН проводились методами математического моделирования путем построения и анализа рабочих зон, формируемых по значениям горизонтального *HDOP* и вертикального *VDOP* геометрических факторов при различном количестве и расположении наземных станций, а также при различных высотах полета ВС. При этом предполагалось, что все станции МПЧН расположены на одной высоте, а также не учитывались возможные ограничения дальности действия системы по условиям прямой видимости.

На рис.2 показаны рабочие зоны для МПЧН, наземные станции которой образуют квадрат, в центре которого находится опорная станция.

Представленные результаты показывают, что рабочая зона для определения горизонтальных координат (построенная по *HDOP*) более равномерна и однородна

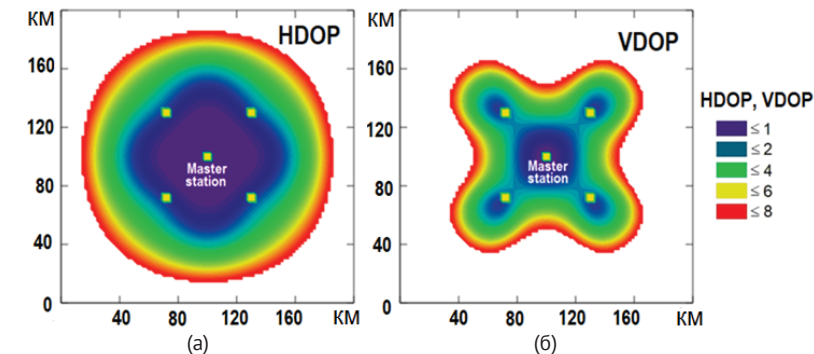


Рис.2. Рабочие зоны МПЧН, построенные по значениям *HDOP* (а) и *VDOP* (б)

(рис.2, а), чем рабочая зона для определения высоты (построенная по *VDOP*) (рис.2, б).

В целом наилучшая точность позиционирования наблюдается при нахождении ВС внутри фигуры, образованной наземными

станциями МПЧН и их базами. При удалении от базовых линий во внешнем направлении точность позиционирования значительно снижается.

На рис.3 представлены рабочие зоны, построенные по *HDOP* и *VDOP*

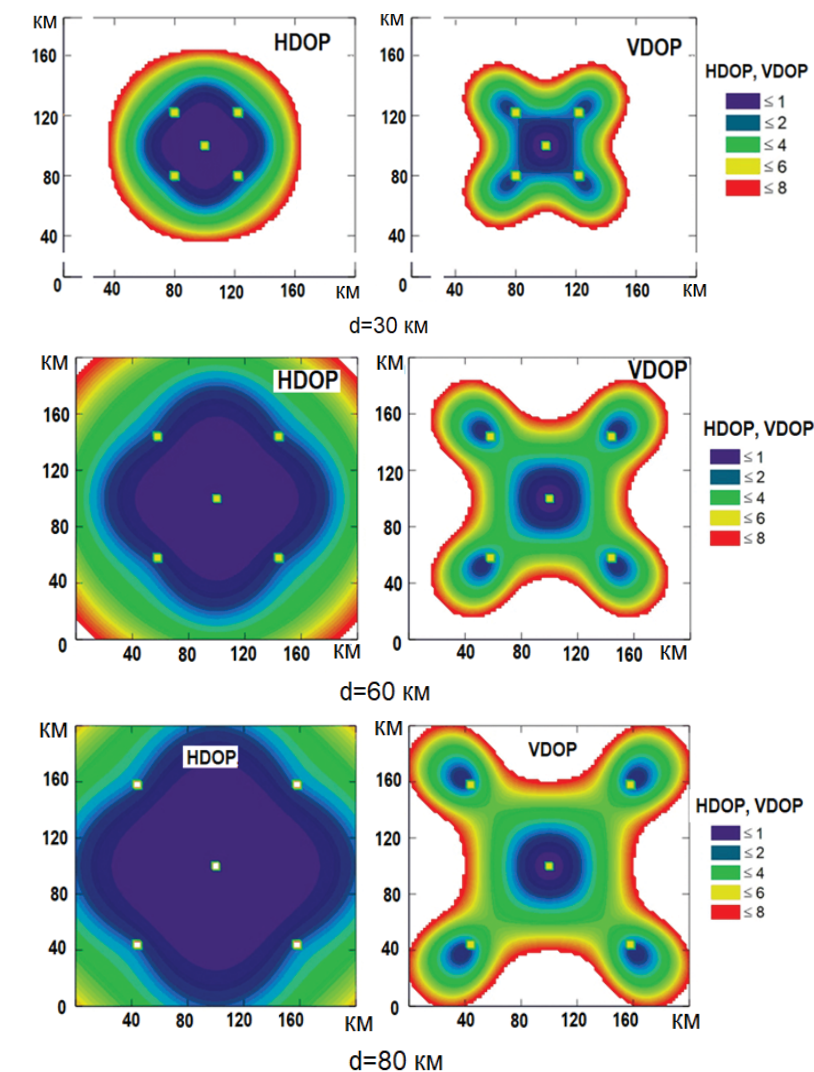


Рис.3. Рабочие зоны МПЧН при различных размерах баз станций

для различных расстояний (баз) d наземных станций МПЧН при высоте полета ВС 10000 м. Мастер-станция расположена в центре.

Увеличение баз между станциями приводит к увеличению площади рабочей зоны, что более выражено для $HDOP$ (рис.4, кривая 1). Увеличение размеров рабочей зоны для $VDOP$ при базах более 80 км незначительно (рис.4, кривая 2).

Результаты исследования влияния высоты полета ВС на характеристики рабочей зоны МПЧН представлены на рис.5. При этом рассматривалась МПЧН из пяти станций при расстоянии между ними 50 км.

Зависимость площади рабочей зоны МПЧН от высоты полета ВС представлена на рис.6 (кривая 1 — по $HDOP$, кривая 2 — по $VDOP$).

Анализ полученных результатов показывает, что изменение высоты ВС оказывает заметное влияние на характеристики рабочей зоны, построенной по $VDOP$, и существенно меньшее — на характеристики рабочей зоны, построенной по $HDOP$. При этом высота полета ВС практически не оказывает влияния на площадь рабочей зоны, построенной по $HDOP$.

На рис.7 представлены результаты исследования характеристик рабочей зоны МПЧН при различном количестве наземных станций.

При достижении некоторого количества станций эффект расширения рабочей зоны снижается, при этом размещение дополнительных станций по периметру дает значительно больший эффект (рис.8).

В реальных условиях измерения $TDOA$ содержат случайные погрешности. Увеличение количества наземных станций позволяет получить избыточное количество измерений, что обеспечит дополнительное повышение точности позиционирования, и, следовательно, приведет к некоторому расширению рабочей зоны, характеризуемой полем точности (рис.8).

Результаты исследования влияния на конфигурацию рабочей зоны МПЧН размещения мастер-станции относительно наземных станций показаны на рис.9.

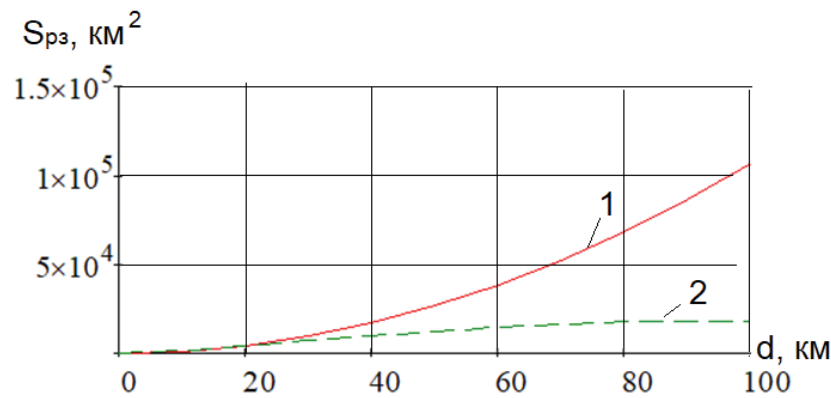


Рис.4. Зависимость площади рабочей зоны от величины базы станций

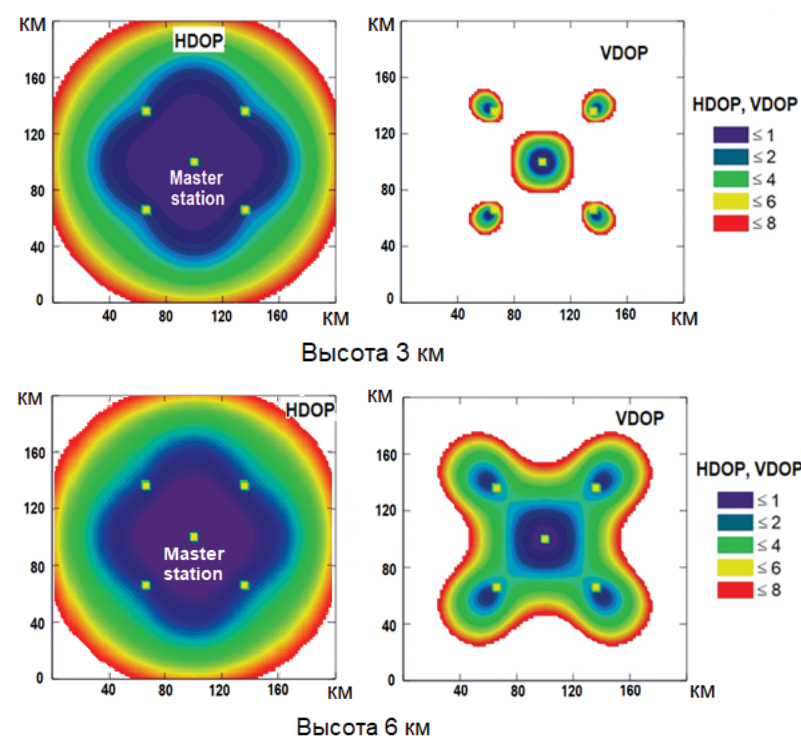


Рис.5. Рабочие зоны МПЧН при различных высотах полета ВС

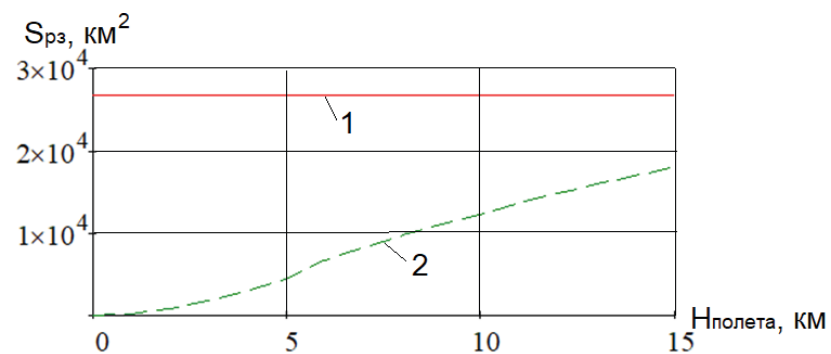


Рис.6. Зависимость площади рабочей зоны от высоты полета ВС

Как видно из полученных результатов, размещение опорной станции оказывает влияние на конфигурацию рабочих зон, построенных как по $HDOP$, так и по $VDOP$. При этом размещение мастер-станции в центре даёт наибольшую, по сравнению с альтернативными вариантами, площадь рабочей зоны.

Заключение

Проведенные исследования показывают, что основной особенностью рабочей зоны МПЧН является ее зависимость от архитектуры наземной части системы (количества и размещения станций, позиции мастер-станции относительно остальных) и высоты полета ВС. При этом вариации рабочей зоны, построенной по $VDOP$ и характеризующей точ-

ность определения высоты ВС, выражены значительно сильнее.

Расположение дополнительных станций внутри фигуры, ограничивающей внешние станции, не приводит к значительному улучшению распределения полей точности МПЧН. Для получения большей площади и симметричности рабочей зоны желательно размещение мастер-станции в центре системы.

В целом наилучшая точность позиционирования наблюдается при нахождении ВС внутри фигуры, образованной наземными станциями МПЧН и их базами. При удалении от базовых линий во внешнем направлении точность позиционирования значительно снижается.

В классических РСДН (Logan-C, Чайка) ввиду больших (до 500-700 км) размеров баз решение навигационной задачи выполняется, как правило, по двум парам станций. Поэтому вблизи баз станций и на базовых линиях либо рабочая зона системы не существует (рис.10) [3], либо точность позиционирования становится недопустимо низкой. Это обусловлено тем, что геометрический фактор разностно-дальномерной системы навигации, определяемый выражением

$$K\{\psi_{B_1}, \psi_{B_2}, \alpha_M\} = \frac{\sqrt{\sin^2 \frac{\psi_{B_2}}{2} + \sin^2 \frac{\psi_{B_1}}{2}}}{2 \sin \alpha_M \sin \frac{\psi_{B_1}}{2} \sin \frac{\psi_{B_2}}{2}}$$

в этих областях рабочей зоны существенно ухудшается из-за близости к нулю базовых углов ψ_{B_1} , ψ_{B_2} или пересечения линий положения под углом α_M , близким к нулю.

В МПЧН этой проблемы не существует ввиду относительно небольших размеров баз и, вследствие этого, возможности использования для решения навигационной задачи избыточного числа измерений $TDOA$ практически от всех пар наземных станций. Однако в МПЧН, как и в классической разностно-дальномерной системе навигации, площадь рабочей зоны будет уменьшаться при ухудшении точности измерений $TDOA$ и при повышении требований к точности определения координат ВС (уменьшении допустимой погрешности позиционирования $\sigma_{доп}$).

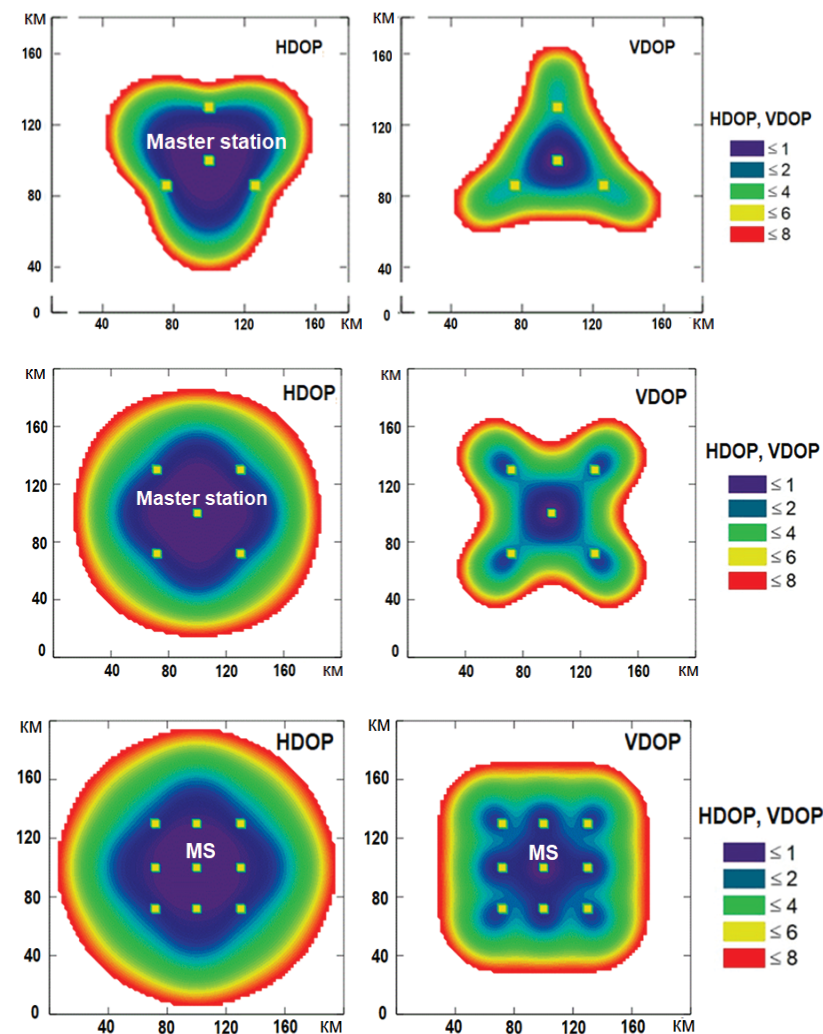


Рис.7. Рабочие зоны МПЧН при различном количестве наземных станций

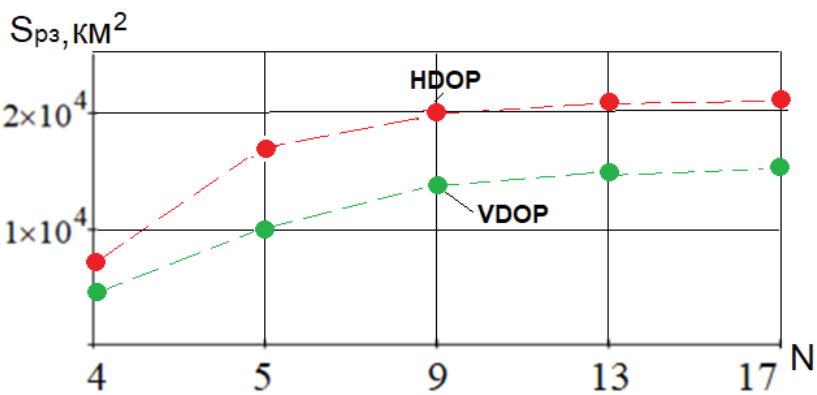


Рис.8. Зависимость площади рабочей зоны от количества станций

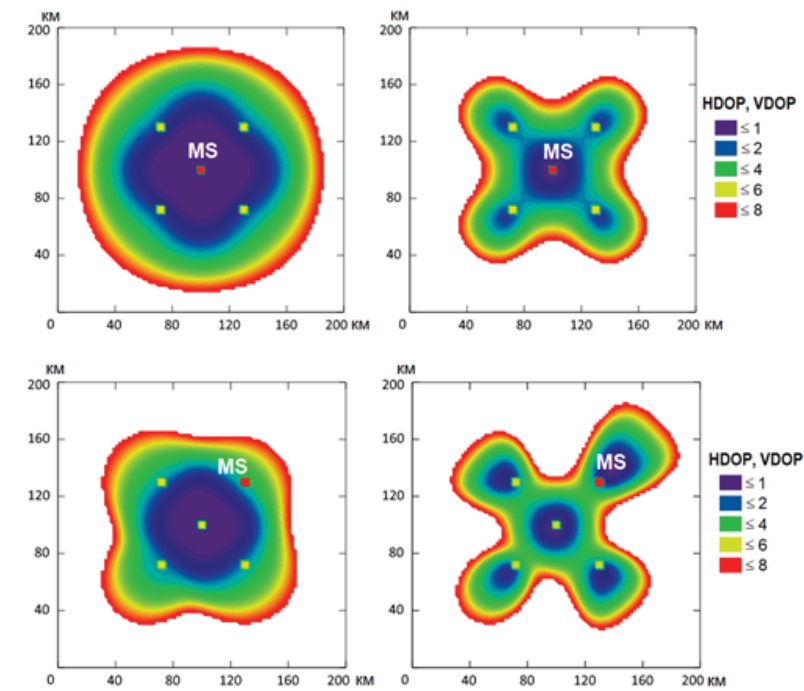


Рис.9. Рабочие зоны МПЧН при различных вариантах размещения мастер-станции

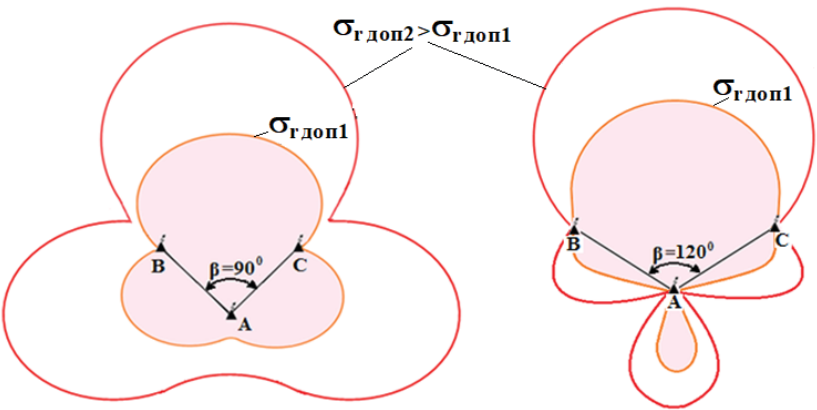


Рис.10. Рабочие зоны РСДН

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Прохоров, А.В. Анализ состояния и оценка возможности реализации средств многопозиционных систем наблюдения для аэродромных АС УВД / А.В. Прохоров, В.Г. Столяров, Д.С. Бондарь // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2013. – № 7(193). – С. 63-69.

2. Скрыпник, О.Н. Радионавигационные системы воздушных судов / О.Н. Скрыпник. – М.: Инфра-М, 2014. – 352 с.

3. Скрыпник, О.Н. Радионавигационные системы аэропортов и воздушных трасс/ О.Н. Скрыпник. – М.: Инфра-М, 2020. – 325 с.

4. Advanced Surface Movement Guidance and Control Systems (A-SMGCS) Manual. Doc. 9830 AN/452 [Electronic resource]. Mode of access: www.icao.int/Meetings/anconf12/Document%20Archive/9830_cons_en%5B1%5D.pdf.

5. Mantilla-Gaviria, I. A. Localization algorithms for multilateration (MLAT) systems in airport surface surveillance / I. A. Mantilla-Gaviria, M. Leonardi, G. Galati, J. V. Balbastre-Tejedor // Signal, Image and Video Processing. – 2015. – Vol. 9(7). – P.1549-1558.

6. Sherman C. Lo Capacity Study of Multilateration (MLAT) based Navigation for Alternative Position Navigation and Timing (APNT) Services for Aviation / Sherman C. Lo // Navigation. – 2015. – Vol. 59(4). – P. 263-279.

7. Multilateration (MLAT) Concept of use [Electronic resource]. Mode of access: www.icao.int/APAC/Documents/edocs/mlat_concept.pdf.

8. Aeronautical Surveillance Manual. Doc. 9924. 2-nd edition. ICAO. [Electronic resource]. Mode of access: <https://standards.gho.spec.com/std/10174090/ICAO%2099242>

9. Multilateration. Executive reference guide. [Electronic resource]. Mode of access: www.multilateration.com/downloads/MLAT-ADS-B-Reference-Guide.pdf.

10. Neven, W.H.L. Wide Area Multilateration / W.H.L. Neven, T.J. Quilter, R. Weedon, R.A. Hogendoorn // Report on EATMP TRS 131/04 [Electronic resource]. Mode of access: www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/files/surveillance-report-wide-area-multilateration-200508.pdf

Статья поступила в редакцию 16.10.2019

УДК 533.6

Л. ГРЕЧИХИН, А. КИРИЛЕНКО

ВЛИЯНИЕ СРЫВНОГО ТЕЧЕНИЯ НА ЛОБОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ШАРА

Леонид Иванович Гречихин – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры технической эксплуатации авиационного и радиоэлектронного оборудования учреждения образования БГАА, Республика Беларусь gretchihin@ya.ru

Алексей Иванович Кириленко – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедры естественнонаучных дисциплин учреждения образования БГАА, Республика Беларусь end-bsaa@yandex.by

Аннотация. Разработана теория срывного течения и экспериментально подтверждена на созданной лабораторной установке. Срывное течение – существенное влияние которое оказывает на полет малых летательных аппаратов в дозвуковой области полета. Проведено компьютерное моделирование аэродинамики обтекания шара. **Ключевые слова:** срывное течение, полет шара, аэродинамика полета, лобовое сопротивление.

Срывное течение является определяющим для летательных аппаратов, которые совершают полет со сравнительно малыми дозвуковыми скоростями. Это в основном беспилотные летательные аппараты (БЛА) микро и мини. В авиации срывное течение изучалось преимущественно экспериментально. Срывное течение порождает возникновение интенсивных вихрей. Подробное исследование возникновения вихрей принадлежит Теодору фон Карману [1]. Анализируя экспериментальные факты, им было установлено, когда и в каких случаях возникают вихри в срывном течении. Шлейф вихрей за движущимся телом был назван «Вихревая дорожка Кармана». Подробное описание экспериментальных фактов возникновения срывного течения дано в работе [2]. Теоретическому обоснованию срывного течения посвящены работы [3-5]. Предложенная газодинамическая модель срывного течения непосредственно экспериментально для газовой среды не была подробно изучена. Сравнение результатов газодинамического расчета с экспериментальными данными было

осуществлено в процессе анализа полетов конкретных летательных аппаратов, когда срывное течение не играло существенной роли. В этой связи возникает цель: проверить разработанную молекулярно-кинетическую модель срывного течения путем проведения непосредственных измерений лобового сопротивления при движении тел не сложных, а более простых форм, с учетом возникающего срывного течения с применением аэродинамики, разработанной в [4-6]. Поставленная цель может быть достигнута путем решения следующих задач:

- определить условия возникновения срывного течения;
- рассмотреть динамику обтекания шара с применением молекулярно-кинетической теории;
- создать модель газодинамического обтекания шара с учетом срывного течения;
- разработать экспериментальную установку для измерения лобового сопротивления тел шарообразной формы;
- разработать программное обеспечение для проведения компьютерного моделирования срывного течения за дви-

жущимся шаром на экспериментальной установке. Последовательно рассмотрим поставленные задачи.

Условия возникновения срывного течения

При обтекании воздушным потоком тел сложной формы в местах, где возникает зона разрежения, происходит срыв течения. Эта ситуация показана на рис.1. Зона разрежения на границе раздела в начальный момент заполняется со скоростью хаотического движения молекул воздуха, т.е., со скоростью звука. Это происходит до тех пор, пока не сформировалось течения воздуха со скоростью, определяемой законом Бернулли. Если угол α меньше $\pi/2$, то тыльная сторона испытывает удар молекул воздуха со скоростью звука. При дозвуковом обтекании величина такого удара может составлять достаточно большую величину. При угле $\alpha \geq \pi/2$ удар молекул воздуха отсутствует, и зона разрежения заполняется со скоростью, определяемой законом Бернулли. Для шара угол α всегда меньше $\pi/2$ поэтому в срывном течении следует

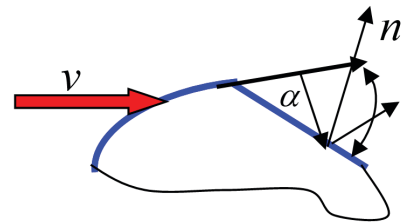


Рис.1. Область пространства, ограниченная углом α , является зоной разложения

учитывать первоначальное заполнение зоны разрежения со скоростью звука.

Динамика обтекания шара в передней полусфере

Шар (рис.2) движется в воздушной среде со скоростью v вдоль оси X-ов. Выделенный элемент поверхности на шаре

$$\Delta S = 2\pi y \Delta y \quad (1)$$

Скорость движения воздуха вдоль нормали и вдоль поверхности шара соответственно равны

$$v_n = v \sin \alpha \text{ и } v_\tau = v \cos \alpha \quad (2)$$

$$\text{где } \alpha = \arctg \left(\frac{x}{R \sqrt{1 - x^2 / R^2}} \right)$$

Элемент поверхности в виде шарового слоя ΔS , нормального по отношению к направлению движения возмущает массу воздуха

$$\Delta m = 2\pi \rho_0 y \Delta y v \Delta t$$

Здесь $\Delta t = \Delta l / v_\tau = \Delta x / v \cos \alpha$ и ρ_0 — плотность окружающего воздуха.

Масса возмущенного воздуха нормально действующая сила на элемент поверхности ΔS

$$\Delta p = \Delta m v_n = 2\pi \rho_0 v^2 \sin \alpha y \Delta y \Delta t \quad (3)$$

Изменение импульса происходит за время Δt . Тогда нормально действующая сила на элемент поверхности ΔS

$$\Delta F_{y0,n} = \frac{\Delta p}{\Delta t} = 2\pi \rho_0 v^2 \sin \alpha y \Delta y \quad (4)$$

а вдоль оси X-ов

$$\Delta F_{y0,x} = 2\pi \rho_0 \sqrt{R^2 - x^2} v^2 \sin^3 \alpha \Delta x / \cos(\alpha) \quad (5)$$

Так как вдоль поверхности выделенного шарового слоя воздух движется со скоростью отличной от нуля, то возникают еще две силы центробежная и сила, обусловленная действием закона Бернулли. Обе эти силы вдоль оси X-ов на поверхности шарового слоя соответственно равны

$$\Delta F_{l,x} = \frac{\Delta m v_\tau^2}{R} = 2\pi \rho_0 \sqrt{R^2 - x^2} v^2 \sin^2 \alpha \Delta x^2 / R \cos \alpha;$$

$$\Delta F_{B,x} = \pi \rho_0 \sqrt{R^2 - x^2} v^2 \sin \alpha \cos \alpha \Delta x$$

Результирующая сила, которая действует на лобовую поверхность движущегося шара вдоль оси X-ов

$$F_X = \int_0^R (dF_{y0,x} - dF_{l,x} - dF_{B,x}) \quad (7)$$

Газодинамический анализ срывного течения.

За шаром возникает срывное течение. Принципиальная схема формирования срывного течения приведена на рис. 3. Передняя полусфера возмущает количество массы воздуха

$$\Delta m = \rho_0 \pi R^2 v \Delta t \quad (8)$$

и возмущенный поток массы в передней полусфере составляет

$$\Delta \dot{m} = \frac{\Delta m}{\pi R^2 \Delta t} = \rho_0 v \quad (9)$$

Соответственно в задней полусфере заполнение зоны разрежения происходит со скоростью звука и тогда

$$\Delta \dot{m}' = \rho v_{36} \quad (10)$$

где $v_{36} = \sqrt{\gamma k_B T / m_a}$ — скорость звука и $\gamma = C_p / C_v$ — отношение теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме; k_B — постоянная Больцмана, m_a — средняя масса молекул воздуха и ρ — плотность воздуха за движущимся шаром.

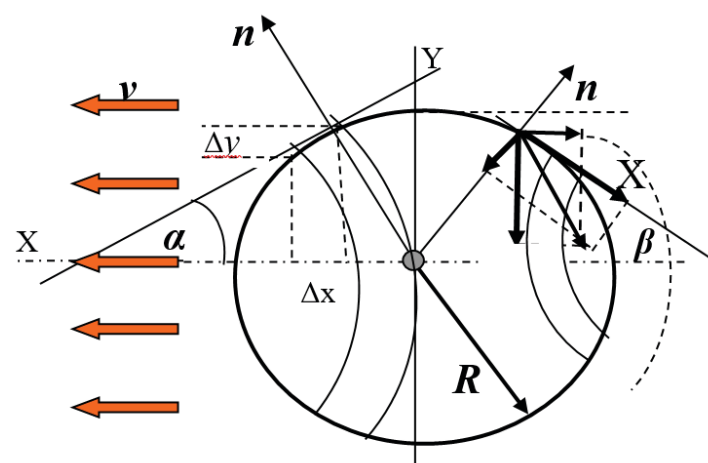


Рис.2. Движение шара в неподвижной атмосфере

Вдоль оси Y-ов скорость заполнения равна скорости звука, а вдоль оси X-ов возникает зона разрежения, которая заполняется со скоростью, определяемой законом Бернулли. Результирующая скорость заполнения зоны разрежения в начальный момент с боковой поверхности определится так

$$v_1 = \sqrt{v_{36}^2 + v^2} \quad (11)$$

Нормальная и тангенциальная составляющие до зоны срывного течения соответственно равны

$$v_n = v_1 \cos(\beta + \gamma) \text{ и } v_\tau = v_1 \sin(\beta + \gamma) \quad (12)$$

$$\text{где угол } \beta = \arctg \left(\frac{x}{R \sqrt{1 - x^2 / R^2}} \right), \text{ угол } \gamma = \arctg \left(\frac{v}{v_1} \right).$$

На основании закона сохранения массы количество расталкиваемой массы передней полусферой за время прохождения фронта заполнения расстояния $R - b$, равного (рис. 2) $\Delta t = (R - b) / v_{36}$ составляет

$$\Delta m = \rho v \pi R^2 \frac{R - b}{v_{36}} \quad (13)$$

Эта же масса содержится в объеме

$$\Delta V = \pi R^2 h - \frac{1}{6} \pi h (3R^2 + 3b^2 + h^2) \quad (14)$$

На основании (13) и (14) следует, что

$$h \cong R t g \beta \quad (15)$$

Здесь угол β неизвестен. Поэтому грубо величину h можно определить иначе. Так, время полного схлопывания зоны разрежения $\Delta t = R / v_{36}$. За это же время шар пройдет расстояние h со скоростью v . Тогда

$$\Delta t = \frac{h}{v} = \frac{R}{v_{36}}$$

Отсюда

$$h \cong \frac{R v}{v_{36}} \quad (16)$$

Этому значению h соответствует критический угол

$$\beta_{кр.} = \arctg \left(\frac{h}{R \sqrt{1 - h^2 / R^2}} \right) \quad (17)$$

С этого угла начинается заполнение зоны разрежения в соответствии с законом Бернулли.

Заполнение зоны разрежения происходит не только с боковой поверхности, но и с противоположной (тыльной) стороны. По скорости эти потоки разные и их взаимодействие приводит к образованию вихревого движения в тыльной стороне. Процесс вихреобразования не оказывает влияния на общее взаимодействие движущегося шара в неподвижной газовой среде. Это обусловлено тем, что отдельные частицы газовой среды не взаимодействуют друг с другом на расстоянии и не передают своего изменения импульса на некотором удалении друг от друга*).

Зона разрежения заполняется по боковой круговой поверхности потоком воздуха своей тангенциальной составляющей относительно

* — Для жидкостей такое взаимодействие является существенным и поэтому переносить результаты, полученные при движении тел в жидкостях, на газы не допустимо.

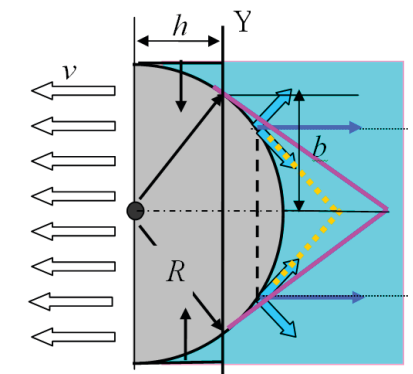


Рис.3. Характер срывного течения за движущимся шаром

поверхности шара, а поток воздуха вдоль направления движения шара своей тангенциальной составляющей препятствует заполнению воздушном зоны разрежения. При определенном угле эти потоки воздуха компенсируют друг друга, и тогда прекратится заполнение зоны разрежения. Нормальная составляющая обоих потоков направлена на поверхность шара. Отраженный и падающий потоки взаимно компенсируют друг друга. В результате в тыльной стороне у поверхности шара воздух остается неподвижным. Давление воздуха в зоне срывного течения определяется скоростью заполнения потоком воздуха в тыльной стороне. В таком предположении

$$\rho_1 v_1 \cos(\beta + \gamma) = \rho_1 v_{36} \cos \beta \quad (18)$$

Столкновение двух потоков воздуха приводит к резкому торможению. Поэтому за движущимся шаром после срыва потока воздух остается неподвижным относительно шара. Угол $\beta + \gamma$, определенный из условия (18), является углом, при котором происходит срыв течения газового потока за движущимся шаром.

Плотность воздуха, заполняющего зону разрежения с боковой поверхности, равна примерно плотности воздуха окружающей среды ($\rho_1 \cong \rho_\infty$), а плотность воздуха непосредственно в зоне разрежения определяется следующим образом

$$\rho_2 = \rho_\infty \exp \left(- \frac{m_a v^2}{2 k_B T} \right) \quad (19)$$

Из условия (18) с учетом (19) следует, что

$$\beta_{cp} \approx \arctg \left(\frac{v_{\infty} \rho_2}{v_1 \rho_{\infty}} \right) \quad (20)$$

Определенный таким образом угол срыва газового потока является законом для газодинамического обтекания шара. Зависимость угла срыва от скорости движения шара показана на рис. 4. Из полученных зависимостей следует: чем больше скорость движения шара, тем дальше от тела удаляется вершина конуса неподвижного газа. В области скорости движения шара от 150 м/с и до скорости звука 340 м/с угол срыва течения, становится отрицательным. Это свидетельствует о том, что конус срывного течения как бы раскрывается, а после преодоления звуковой скорости переходит в конус Маха. Угол срыва потока за движущимся шаром при малых скоростях движения не зависит от радиуса шара, а зависит только от скорости его движения и температуры окружающей среды.

До срывного течения масса воздуха, которая взаимодействует нормально с поверхностью шарового слоя $\Delta S = 2\pi r \Delta l$, определяется по (10). Эта масса в тыльной стороне ударно воздействует нормально на элемент поверхности ΔS силой

$$\Delta F'_{y0,n} = 4\pi R \rho v^2 \cos^2(\beta + \gamma) \Delta x.$$

Центробежная сила нормально поверхности ΔS за время взаимодействия потока воздуха на длине Δl

$$\Delta F'_{ll,n} = 2\pi r \rho v^2 \cos(\beta + \gamma) \sin(\beta + \gamma) \Delta x^2 \quad (21)$$

Сила воздействия на основании закона Бернулли

$$\Delta F'_{b,n} = \pi R \rho v^2 \sin(\beta + \gamma) \Delta x \quad (22)$$

При этом плотность воздуха на удалении h равна плотности окружающей среды, а в области от h до точки срыва потока, равного $h_1 = R \sin(\beta_{cp} + \gamma) \Delta x$, плотность постепенно уменьшается по закону

$$\rho = \rho_{\infty} \exp \left(- \frac{m_a v^2 \sin^2(\beta + \gamma)}{2 k_b T} \right) \quad (23)$$

Результирующая сила воздействия за счет заполнения зоны разрежения до расстояния по оси X-ов на величину h_1

$$F'_{рез} = \int_0^h \sin \beta (-dF'_{y0,n} + dF'_{ll,n} + dF'_{b,n}) + \int_h^h \sin(\beta + \gamma) (-dF'_{y0,n} + dF'_{ll,n} + dF'_{b,n}) \quad (24)$$

В области срывного течения на тыльную поверхность шара действует сила сдерживания вследствие пониженного давления в области после срыва течения, которая направлена нормально поверхности шара.

Газодинамическое давление за шаром в области за срывом течения определяется законом [5]

$$P_{cp} = P_{\infty} - \frac{1}{2} \rho v'^2 \quad (25)$$

На основании постоянства угла срыва интегрирование следует производить по площади шарового сектора, размер которого: высота $h' = 2R \cos^2(\beta + \gamma)$ и основание $a = R \sin(\beta - \gamma)$.

Начиная с угла срыва потока, возникающая разность давлений разрежения и окружающей среды препятствует движению шара. Эта

разность давлений действует нормально поверхности шарового сектора в области за срывом течения.

Общее лобовое сопротивление шара является суммой

$$\bar{P}_x = F'_x + F'_{рез} + F''_{рез} \quad (26)$$

и зависит от размера шара, скорости его движения, давления и температуры окружающей среды.

Полученное лобовое сопротивление шара с применением молекулярно-кинетической теории экспериментально проверялось следующим образом.

Экспериментальная установка

Для проверки предложенной модели формирования общего лобового сопротивления шара применен математический маятник. Схематически экспериментальная установка показана на рис. 5. Установка содержит математический маятник, у которого в качестве груза подвешивается шар. На экране 3 отмечается положение шара маятника при начальном отклонении на угол менее 10° и это положение фиксируется на экране и измеряется относительно положения равновесия. После запуска маятника определяется время прохождения числа колебаний, когда амплитуда колебаний уменьшается в n раз. При использовании упругой нити подвеса возбуждаются колебания маятника в двух взаимно перпендикулярных направлениях, т.е., вдоль оси X-ов и вдоль оси Y-ов. Вдоль оси X-ов возникают упругие колебания самого математического маятника, а вдоль оси Y-ов возбуждаются упругие коле-

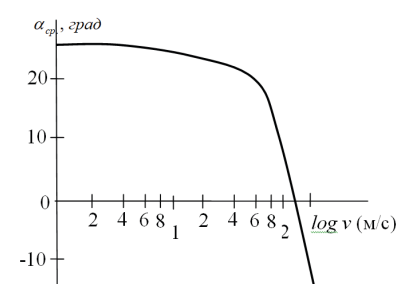


Рис.4. Зависимость угла срыва потока воздуха за движущимся шаром диаметром 1 м от скорости его движения в нормальных условиях

бания вдоль нити подвеса. В этом случае система консервативная и открытая. Для такой системы закон сохранения энергии выполняется с учетом взаимодействия с окружающей средой и с учетом внутренней диссипации энергии. Тогда при движении маятника к положению равновесия закон сохранения энергии запишется так:

$$mgh = \frac{mv^2}{2} + \int_0^a \bar{P}'_x L da + \frac{k_y \delta^2}{2} \quad (27)$$

и наоборот от положения равновесия ($\alpha = 0$ и $\delta_0 = mg/k_y$),

$$\frac{mv^2}{2} = mgh' + \int_0^a \bar{P}'_x L da - \frac{k_y \delta'^2}{2} \quad (28)$$

При отклонении маятника относительно положения равновесия на угол α высота подъема составит $h = 2L \sin^2(\alpha/2)$, а коэффициент упругости нити подвеса $k_y = \frac{(m_2 - m_1)g}{\Delta L}$ определяется в статическом состоянии с применением разных масс подвеса m_1 и m_2 , которые изменяют длину нити подвеса на величину ΔL ; сила трения маятника о воздух $\bar{P}'_x$ находится по (26). Растяжение нити подвеса под действием силы тяжести и центробежной силы

$$\delta = \left[mg \cos \alpha + \frac{mv^2}{L} \right] / k_y \quad (29)$$

Для элемента дуги $dl = L da$ закон сохранения энергии при движении к положению равновесия представится так

$$mg dh = mvdv + k_y \delta d\delta + \bar{P}'_x L da \quad (30)$$

а при движении от положения равновесия

$$mvdv = mg dh - k_y \delta d\delta + \bar{P}'_x L da \quad (31)$$

Сила трения $\bar{P}'_x$ в данном случае является лобовым сопротивлением движущегося шара в воздухе. Следовательно, при выполнении одного колебания потеря энергии составит

$$\Delta \Pi = \sum_{i=0}^4 \int_0^{\alpha_i} \bar{P}_{x,i} L da_i \quad (32)$$

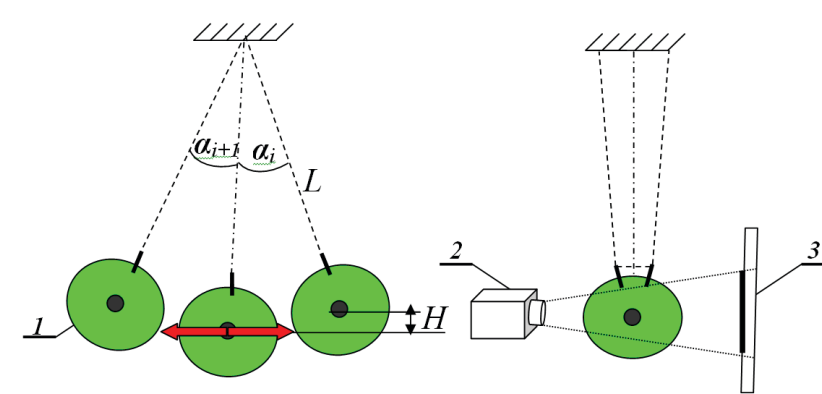


Рис.5. Схема экспериментальной установки: 1 – испытуемый шар; 2 – проектор; 3 – экран

Здесь $\bar{P}_{x,i} = \frac{P_{x,i+1} + P_{x,i}}{2}$, а $L da_i$ – элемент среднего значения дуги, которую описывает маятник в процессе выполнения i -го колебания. $\Delta \Pi$ – внутренняя диссипация энергии.

Компьютерное моделирование

При разработке программного обеспечения компьютерного моделирования используем конкретный пример двух шаров разной массы и разных размеров по диаметру. Угол начального отклонения маятника не более $\alpha \approx 8^\circ$. При отклонении маятника на угол $d\alpha$ он сместится относительно начального положения по высоте на величину

$$dh = L \sin \alpha \cdot d\alpha \quad (33)$$

Дифференциал от изменения длины нити подвеса (29)

$$d\delta = \frac{1}{k_c} \left[mg \sin \alpha d\alpha + \frac{2mvdv}{L} \right] \quad (34)$$

происходит под действием сил тяжести и центробежной силы за достаточно малый промежуток времени колебания маятника.

Маятник совершает два независимых колебания – под действием силы тяжести в горизонтальной плоскости и под действием силы натяжения на нить подвеса маятника в вертикальной плоскости. Тогда при совершении некоторого числа колебаний маятника N , потеря энергии составит

$$mg(h_2 - h_1) = \sum_{i=1}^N \Delta \Pi_i + k_y (\bar{\delta}_2^2 - \bar{\delta}_1^2) / 2 \quad (35)$$

При проведении эксперимента высоты h_2 и h_1 задаются, а амплитуды колебания вдоль нити подвеса равны соответственно

$$\delta_1 = \frac{mg + mv_1^2 / L}{k_c}; \quad \delta_2 = \frac{mg + mv_2^2 / L}{k_c} \quad (36)$$

На основании этих данных определяются общие потери энергии при трении о воздух и на растяжение нити подвеса. Общая энергия потерь составляет $mg(h_1 - h_2)$, а потери энергии на растяжение нити подвеса – $0.5 k_y (\delta_2^2 - \delta_1^2)$. Полученные экспериментальные данные для ряда

маятников приведены в таблице.

Так как сила трения является не постоянной величиной на длине дуги l , то при движении маятника к положению равновесия на элементе дуги $\Delta l = l_{i+1} - l_i$ закон сохранения энергии в общем виде запишется следующим образом:

$$mgL(\cos\alpha_{i+1} - \cos\alpha_i) = \frac{m(v_{i+1}^2 - v_i^2)}{2} + \bar{P}'_{x,i}L\Delta\alpha + \frac{1}{k_yL^2}(mgL\cos\alpha_{i+1} + mv_{i+1}^2)^2 - \frac{1}{k_yL^2}(mgL\cos\alpha_i + mv_i^2)^2$$

(37)

а при движении от положения равновесия

$$\frac{m(v_i^2 - v_{i+1}^2)}{2} = mgL(\cos\alpha_i - \cos\alpha_{i+1}) + \bar{P}'_{x,i}L\Delta\alpha - \frac{1}{k_yL^2}(mgL\cos\alpha_i + mv_i^2)^2 + \frac{1}{k_yL^2}(mgL\cos\alpha_{i+1} + mv_{i+1}^2)^2$$

(38)

Соответственно скорость движения шара и максимальный угол отклонения маятника относительно положения равновесия в первом случае определяются рекуррентным соотношением вида:

$$v_{i+1} = v_i + \Delta v_i$$

$$\alpha_{i+1} = \alpha_i - \Delta\alpha_i$$

(39)

а во втором случае

$$v_{i+1} = v_i - \Delta v_i$$

$$\alpha_{i+1} = \alpha_i + \Delta\alpha_i$$

(40)

В уравнениях (39) и (40) изменение угла $\Delta\alpha_i$ задается, а изменение скорости движения маятника на участке $\Delta\alpha_i$ определяется следующим образом

$$\Delta\bar{v}_i = \frac{g}{\bar{v}_i(1 + 2A_i/L)} \left[(L + A_i) \sin\alpha_i \Delta\alpha_i - \bar{P}_{x,i}L\Delta\alpha_i / mg \right]$$

(41)

где величина $A_i = \frac{m}{k_y} \left(g \cos\alpha_i + \frac{\bar{v}_i^2}{L} \right)$, а $\bar{v}_i = \frac{v_{i+1} + v_i}{2}$ – среднее значение скорости движения шара в i -том интервале.

Для рекуррентных соотношений (40) изменение скорости на участке $\Delta\alpha_i$ определяется несколько иначе

$$\Delta\bar{v}_i = \frac{g}{\bar{v}_i(1 + 2A_i/L)} \left[(L + A_i) \sin\alpha_i \Delta\alpha_i + \bar{P}_{x,i}L\Delta\alpha_i / mg \right]$$

(42)

а величина A_i остается неизменной.

Выводы

Таким образом, общее изменение потенциальной энергии маятника на i -м элементе дуги составляет:

$$dE_i^p = mgL\alpha_i d\alpha$$

(43)

и расходуется эта энергия на увеличение или уменьшения кинетической энергии колеблющегося маятника, а также на потери в процессе преодоления сил трения о воздух и сил упругости нити подвеса

$$dE_i^K = mv_i dv_i$$

$$dA_{\text{тр.}} = \bar{P}'_{x,i}L d\alpha_i$$

$$dA_{\text{упр.}} = 2k_y \delta d\delta$$

(44)

Коэффициент упругости нити подвеса определяется экспериментально в статическом состоянии, когда маятник находится в положении равновесия. Затем измеряется количество периодов колебания и время этих колебаний при уменьшении амплитуды за выбранное смещение относительно положения равновесия. Результаты проведенных измерений результирующей энергии потерь и средней мощности потерь представлены в таблице. Работа сил трения, полученная в соответствии с молекулярно-кинетической теорией по формуле (26) и работа упругих сил растяжения нити подвеса с учетом (36) приведены также в таблице, а результирующая работа и мощность потерь, вычисленные теоретически, в качестве сравнения с экспериментальными данными приведены в таблице под чертой.

В процессе колебания маятника в передней полусфере воздух непосредственно у поверхности движущегося шара обладает за счет сжатия повышенным как давлением, так и плотностью по отношению к окружающей среде. В процессе проведения компьютерного моделирования распределение давления в передней полусфере уменьшалось по косинусоидальному закону. В этом случае при нормальном падении потока воздуха давление возрастает в два раза и в дальнейшем стремится к давлению окружающей среды.

Важно было установить, какое влияние оказывают колебания вдоль нити подвеса. Для этого применены два шара с примерно одинаковым весом: деревянный диаметром 92,7 мм весом 182 г и свинцовый шар диаметром 30 мм и весом 177,1 г. Если трение о воздух не является существенным, то затухание для обоих колеблющихся шаров должно быть одинаковым. Реально затухание деревянного шара оказалось значительно большее, чем для свинцового шара. Следовательно, трение о воздух является определяющим фактором при колебании шара в воздушной неподвижной атмосфере.

В срывном течении участвует только возмущенная масса и определяется размером шара.

Таблица. Колебания шара при уменьшении амплитуды колебания в 2/3 раза при коэффициенте упругости нити подвеса 76,52 Н/м

Наименование объекта Q	Масса, г	Количество колебаний	Время колебаний, с	Работа сил трения о воздух, Дж	Работа сил упругости, Дж	Результирующая энергия потерь, Дж	Средняя мощность потерь, мкВт
Дюралюминий диметром 3,0 см	38,1	41 ± 1	121 ± 1	4.34·10 ⁻³	2.0·10 ⁻⁵	4,36·10 ⁻³	36,0
Латунь диаметром 3,0 см	118,1	112 ± 1	329 ± 1	13,3·10 ⁻³	1.92·10 ⁻⁵	13,5·10 ⁻³	41,0
Дюралюминий диметром 5,8 см	298,4	170 ± 1	504 ± 1	32.9·10 ⁻³	1.23·10 ⁻⁵	34,1·10 ⁻³	67,7
Биллиардный шар диаметром 3,8 см	55	49 ± 1	144 ± 1	6.25·10 ⁻³	4.16·10 ⁻⁵	6,29·10 ⁻³	43,7
Биллиардный шар диаметром 6,0 см	211,8	132 ± 1	394 ± 1	23.6·10 ⁻³	61.7·10 ⁻⁵	24,20·10 ⁻³	61,4
Деревянный шар диаметром 9,27 см	182,6	56	168 ± 1	20.4·10 ⁻³	45.9·10 ⁻⁵	20,9·10 ⁻³	124,4
Свинцовый шар диаметром 3,0 см	177,1	133	395 ± 1	19.8·10 ⁻³	43.2·10 ⁻⁵	20,3·10 ⁻³	51,4

Если не учитывать срывное течение, то деревянный шар должен тормозиться в десять раз сильнее, а с учетом срывного течения он тормозится только в 2,44 раза сильнее, так как для деревянного шара масса возмущенного воздуха значительно больше, чем для

свинцового шара.

Для алюминиевого шара и свинцового шара возмущенные массы равны. Сила воздействия срывного течения одна и та же. Тогда эффективность воздействия будет определяться массой тела. Воздействие на свинцовый

по отношению к алюминиевому

шару составит $\frac{m_{Pb}}{m_{Al}} = 4.65$. Соответственно потери энергии на одно колебания $\frac{\Delta A_{Pb}}{\Delta A_{Al}} = 1.4$

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Т. фон Карман. Аэродинамика. Избранные темы в их историческом развитии / Т. фон Карман. – Ижевск: 2001. – 208 с.

2. Беляев, Е. Н. Срывные течения жидкостной и газовой фазы / Е. Н. Беляев, В. В. Червяков // Двигатель. – 2010. – №3 (69). – С. 38.

3. Симаков, Н. Н. Расчет обтекания и сопротивления шара в ламинарном и сильно турбулентном потоке / Н. Н. Симаков // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83. Вып. 4. – С. 16 - 20.

4. Гречихин, Л. И. Сила давления воздуха на движущуюся пластину / Л. И. Гречихин // Military Technical Courier. Scientific periodical of the Ministry of defence of the Republic of Serbia. – 2014. – Vol. LXII, № 4. – P. 38-50.

5. Гречихин, Л. И. Срывное течение при движении шара в неподвижной газовой среде / Л. И. Гречихин // «Гражданская авиация: XXI век»: сборник материалов VI Междунар. молодежной науч. конф., Ульяновск, 11–12 апр. 2014 г. / УВАУ ГФ(И). – Ульяновск. – С. 12–18.

6. Гречихин, Л. И. Аэродинамика летательных аппаратов / Л. И. Гречихин, А. А. Лапцевич, Н. Г. Куць. – Минск: ИООО «Право и экономика», 2012. – 285 с.

Статья поступила в редакцию 02.12.2019

УДК 621.77

МИНГ ЧЕНГ, ХОНГ-ЯН ГАН, ШИ-ХОНГ ДЖАНГ,
В. ПЕТРЕНКО, А. ЖУКОВА, А. МАТЯС

ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ
ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ
АВИАЦИОННОГО
ЖАРОПРОЧНОГО
ЖЕЛЕЗО-НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА
GH4169

Минг Ченг – Philosophy of Doctor, Associate Professor, Institute of Metal Research Chinese Academy of Sciences, KHP
mcheng@imrac.cn

Ши-Хонг Джанг – д.т.н, профессор, исполнительный секретарь Китайского исследовательского объединения глубокой вытяжки металлов, КНР
shzhang@imr.ac.cn

Александр Николаевич Матяс – младший научный сотрудник лаборатории объемных гетерогенных систем ФТИ НАН Беларуси, Республика Беларусь
lab-pd.fti@mail.ru

Владимир Валерьевич Петренко – заведующий лабораторией предельной деформируемости и поперечно-клиновой прокатки ФТИ НАН Беларуси, Республика Беларусь
lab-pd.fti@mail.ru

Анна Анатольевна Жукова – кандидат технических наук, проректор по научной работе учреждения образования БГАА, Республика Беларусь
hannazhukova@mail.ru

Аннотация. Лопатка, работающая при высоких температурах в сочетании с поверхностным контактом с горящими газами, является одной из самых нагруженных и в тоже время ответственных деталей современного газотурбинного двигателя.

Основные способы изготовления лопаток – это деформация и литье. Деформируемые сплавы имеют больший эксплуатационный ресурс за счет фазовых изменений и измельчения зерна металла. Однако необходимость достичь высокой жаропрочности требует дальнейшего легирования сплавов, что ведет к потере основного свойства сплава при деформации – снижению или потере пластичности.

Устойчивость к разрушению при циклическом нагружении и термической усталости, воздействию раскаленной газовой среды, которая вступая в поверхностную реакцию, вызывает газовую коррозию разупрочня границы зерен металла, жаропрочность, пластичность – эти требования обуславливают выбор материала для изготовления лопаток.

Ключевые слова: железо-никелевый сплав, поперечно-клиновая прокатка, микроструктура.

Сплав на никелевой основе GH4169 широко используется при изготовлении ключевых компонентов авиационной и космической техники из-за его превосходных свойств сохранять свою работоспособность при температурах до 650°C. Входящие в состав сплава компоненты в процентном отношении указаны в

таблице. Однако механические свойства сплава GH4169 значительно зависят от микроструктуры, которая формируется в процессе деформации. Размером зерна, главным образом, управляет процесс горячего деформирования (горячая ковка, горячее выдавливание), при котором достигается приближенная форма

заготовки, и дальнейшая механическая обработка, которая позволяет получить готовую лопатку газотурбинного двигателя.

Используемый метод горячейковки низкий в эффективности и не позволяет гарантировать высокую точность, что в последствии требует механической обработки на станках с ЧПУ. Данная обра-

Таблица. Процентное содержание компонентов сплава GH4169, %											
C	Ni	Cr	Nb	Mo	Ti	Al	B	Si	Mn	Co	Fe
0.027	53.74	17.58	5.35	3.01	0.98	0.52	0.0025	0.009	0.07	0.4	остальное

ботка значительно снижает производительность, снятие металла в стружку удаляет сформированные в процессе деформирования направленные волокна металла и поверхностную структуру, распределение остаточных напряжений на поверхности изменено. Усталостная стойкость серьезно снижена. Требуется дальнейшая термическая и финальная механическая обработка для получения рабочего изделия. Поэтому промышленность продолжает поиски эффективного способа не только литейных технологий получения лопаток, но и пластического деформирования.

Одним из таких способов, который позволяет получить поковку и с этого же нагрева передать ее на точную штамповку, является поперечно-клиновая прокатка.

Поперечно-клиновая прокатка относится к методу непрерывного локального деформирования цилиндрической заготовки между инструментом, размещенном на валках или между инструментом плоского типа, при этом формообразование заготовки происходит в процессе прокатывания по гравюре клинового инструмента. Поперечно-клиновая прокатка представляет собой технологию пластического деформирования с высокой производительностью и высокой точностью.

Во время прокатки материал подвергается радиальной и осевой деформации одновременно, что требует от материала полного использования его потенциала пластичности. Поперечно-клиновая прокатка позволяет получать широкую номенклатуру изделий с высокими эксплуатационными характеристиками: прочность и износостойкость. Этот процесс подходит для пластического деформирования всех видов конструкционных сталей, ряда легированных и нержавеющей, сплавов на медной основе, титана и его сплавов, железо-никелевых сплавов и сплавов на основе циркония и пр.

В настоящее время на технологию поперечно-клиновой прокатки обращено внимание во всем мире. Она, главным образом, используется в производстве автомобильных частей, всевозможных осей и валов, заготовок типа вал-шестерня и т.д. Существует несколько схем поперечно-клиновой прокатки (рис. 1).

Поперечно-клиновая прокатка позволяет осуществить горячее формообразование жаропрочного сплава GH4169 без нарушения сплошности прокатываемой заготовки, внешних дефектов и без срыва процесса.

Исследование того, какие структурные преобразования и изменения в процессе прокатки происходят со сплавом, даст полную картину понимания и уверенности в надежности получаемой детали.

На данный момент исследован механизм течения металла, возникаемые напряжения в заготовке, распределение температуры по объему заготовки и в контакте заготовка-инструмент при поперечно-клиновой прокатке сплава

GH4169 методом конечных элементов [1-2]. Получены экспериментальные данные о изменении усилий и других технологических параметров при прокатке сплава GH4169 [3]. Анализируя экспериментальные данные был установлен эффект межфазного скольжения при поперечно-клиновой прокатке сплава GH4169 [4]. Исследованы температурные процессы, влияние условий деформации и напряжений на изменение микроструктуры и рекристаллизационные процессы в сплавах на основе никеля при их деформации [5]. Установлено, что эволюция δ фазы в сплаве GH4169 во время горячего пластического деформирования происходит от чешуйчатой формы к гранулообразной [6]. Изучены процессы изменения микроструктуры сплавов на основе никеля при высоких напряжениях [7].

Однако нет информации об исследованиях, сосредоточенных на эволюции микроструктуры, какой эффект на это оказывает δ-фаза, и нет описаний процесса морфологии δ-фазы

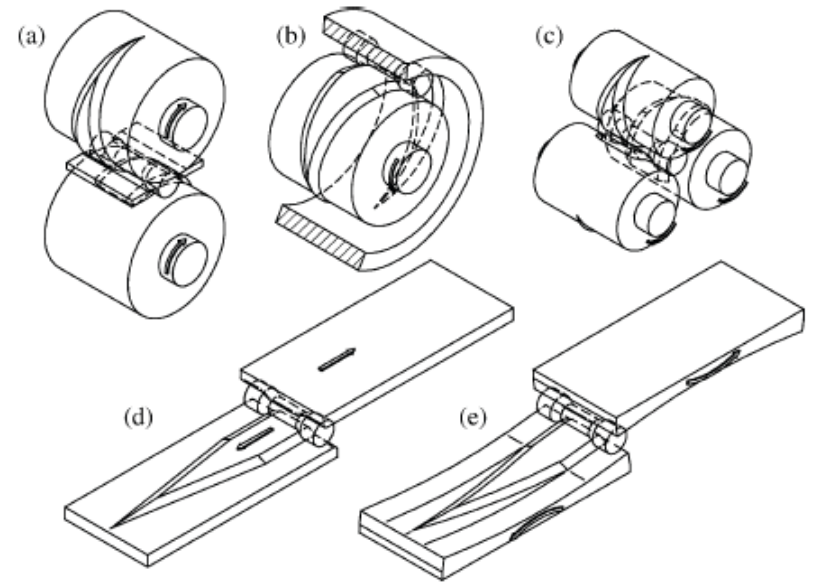


Рис.1. Схемы поперечно-клиновой прокатки
а) – двухвалковая, б) – валково-секторная, в) – трехвалковая, г) и д) – плоско-клиновые

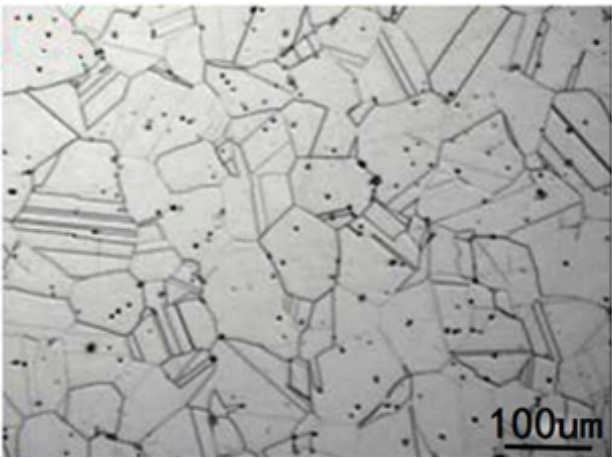


Рис.2. Микроструктура сплава GN4169 в твердом состоянии

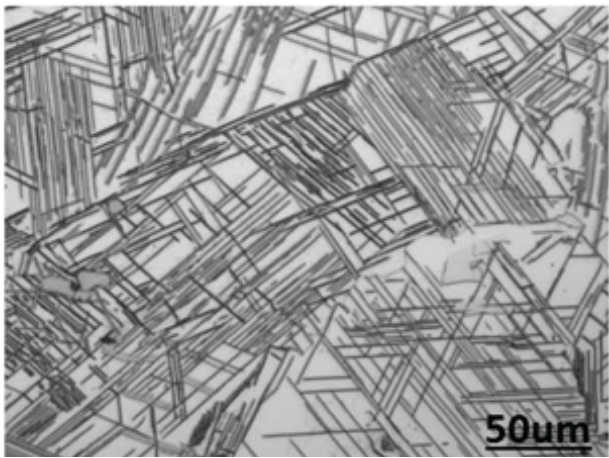


Рис.3. Микроструктура состаренного сплава GN4169

сплава GN4169 при поперечно-клиновой прокатке. Данная статья рассматривает эволюцию микроструктуры сплава GN4169 в твердом состоянии при поперечно-клиновой прокат-

ке, а так же эволюцию δ -фазы, создавая этим теоритическую основу для разработки процесса поперечно-клиновой прокатки лопатки авиационного двигателя. Материал — коммерчески до-

ступный высококачественный прутки сплава GN4169 диаметром 40 мм при длине в 100 мм. Химический состав приведен в таблице. С целью устранить эффекты остаточного напряжения образцы

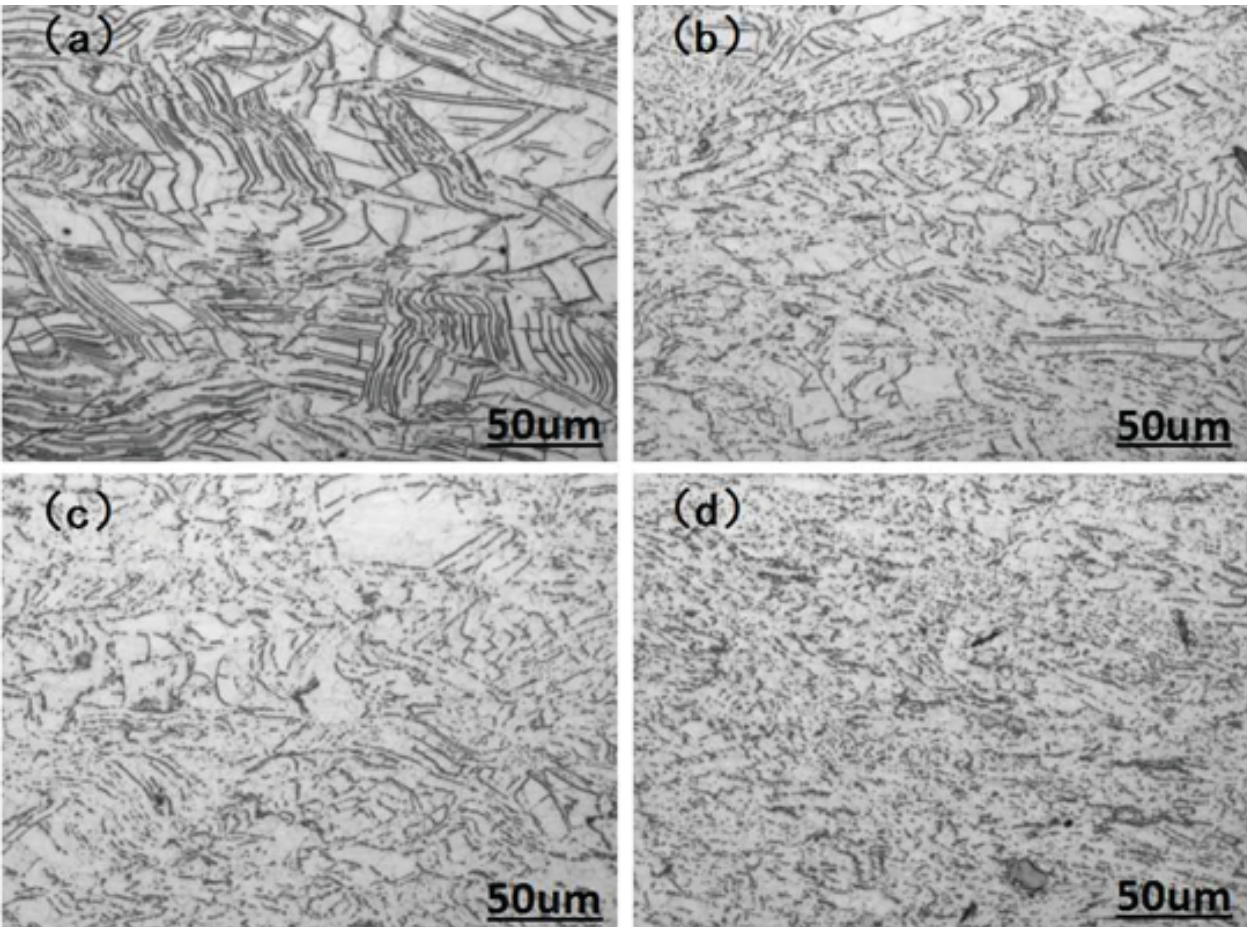


Рис.4. Изменения δ -фазы сплава GN4169 при поперечно-клиновой прокатке с различной степенью обжатия: а) – 30%, б) – 38%, в) – 43%, г) – 50%

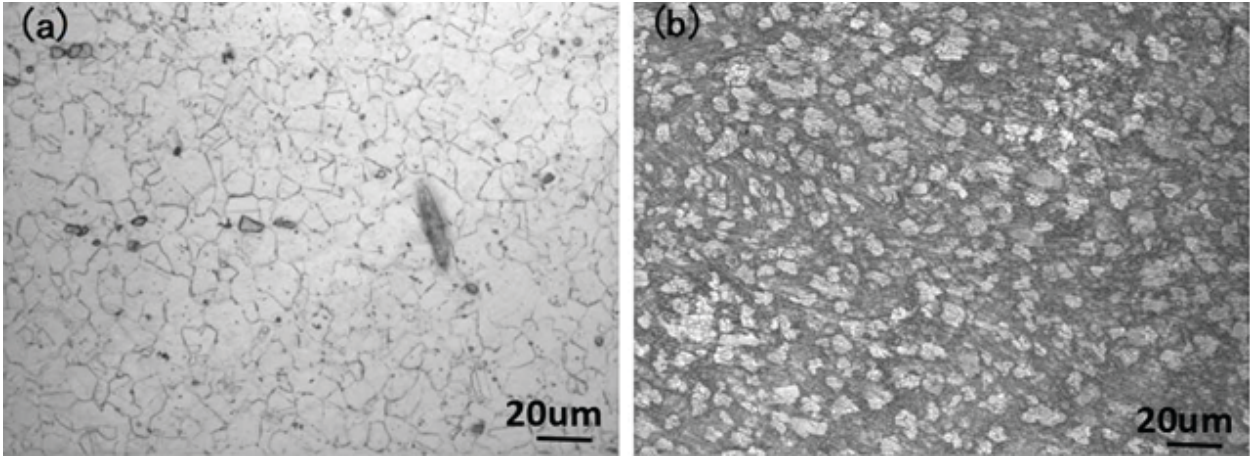


Рис.5. Микроструктура сплава GN4169 прокатанного с 50%-м обжатием из исходного прутка без предварительной термической обработки – а) и предварительно состаренного – б)

были термически обработаны в течении 40 минут при температуре 1040°C с последующим охлаждением в воде и старением при температуре 915°C в течении 24 часов с охлаждением в воде. Поперечно-клиновая прокатка осуществлялась на двухвалковом прокатном стане с диаметром валков 630 мм. Геометрия инструмента представляла собой расходящийся клин с подъемом 5° и боковой плоскостью 28°. Температура прокатки составила 940°C при скорости вращения валков 12 оборотов в минуту. Охлаждение до комнатной температуры на воздухе. После прокатки образцы были разрезаны вдоль оси, после чего подготовлены к травлению в среде HCl-H₂O. Исследования проводились с помощью металлографического микроскопа Axiovert200MAT и растрового электронного микроскопа SSX-550 ZEISS. Образец был электролитически полирован в растворе 80% CH₃CH₂OH 20% HClO₄ после чего в микроскоп электронной дифракции обратного рассеяния FEI Nano SEM Nova 430. Микроструктура сплава GN4169 представляет собой гомогенный равноосный кристалл с небольшим количеством близнецов (рис. 3), средняя зернистость 80µm. Рис. 3 показывает микроструктуру сплава GN4169, который претерпел старение δ -фазы. Морфология δ фазы — чешуйка, средняя зернистость 100µm. На рис. 4 показана микроструктура при различных обжа-

тиях образца состаренного сплава GN4169 с δ -фазой при температуре прокатки 940°C. На рис. 4(а) 30%-е обжатие образца. Исходная чешуйчатая δ -фаза была согнута, искривлена и сломана в некоторой степени, и небольшое количество было преобразовано в короткие вытянутые элементы или гранулы, в то время как δ -фаза все еще чешуйчатая. Когда степень обжатия составила 38% (рис. 4(б)), исходная чешуйчатая δ -фаза главным образом трансформировалась в короткую вытянутые элементы или гранулы, в то время как только небольшая часть чешуйчатой δ -фазы обнаруживается в местном масштабе в микроструктуре, которая представляет осевое распределение. Когда степень деформации составила 43% (рис. 4(в)), δ -фаза непрерывно изломана, чешуйчатая δ -фаза не обнаруживается, структура представляет собой короткие зернистые вытянутые элементы различной длины с различной степенью изгиба. При степени обжатия 50%, δ -фаза полностью изменилась на гранулированную фазу и главным образом рассеивается в матрице в форме сферической дисперсии (рис. 4 (г)). Рис. 5 показывает микроструктуры прокатанного оригинального образца и состаренного образца сплава GN4169 после поперечно-клиновой прокатки с обжатием 50% при температуре 940°C. Видно, что во время прокатки в сплаве происходит динамическая перекристаллизация, которая сильно зависит от термо-

обработки. Средняя зернистость (2.84µm) δ -фазы состаренного образца на рис. 5(б) значительно меньше, чем средняя зернистость (25.3µm) образца прокатанного без термической обработки перед прокаткой (рис. 5(а)). Это вызвано тем, что δ -фаза разрушается в гранулы, границы которых контактируют и тормозят рост зерна. Рис. 6 показывает результат обработки изображения микроструктуры в программе Channel 5 с анализом ориентации зерен сплава GN4169 при поперечно-клиновой прокатке с обжатием 30%. Грубые черные и белые тонкие грани — большие угловые границы зерна (> 15°) и небольшие угловые границы зерна (<15°) соответственно. Очевидно, что прокатанный без предварительной термической обработки образец сплава GN4169 имеет много небольших угловых границ зерен. В состаренной δ -фазе небольшие угловые границы зерна, и количество их очень небольшое. На рисунке показана микроструктура δ -фазы состаренного сплава GN4169 после поперечно-клиновой прокатки с различной степенью обжатия. Микроструктура — динамически рекристаллизованное зерно, которое деформировалось из начального большого зерна когда степень обжатия составила 30% и 38%. Исходное большое зерно претерпело полную рекристаллизацию во время поперечно-клиновой прокатки с степенью обжатия 50%.

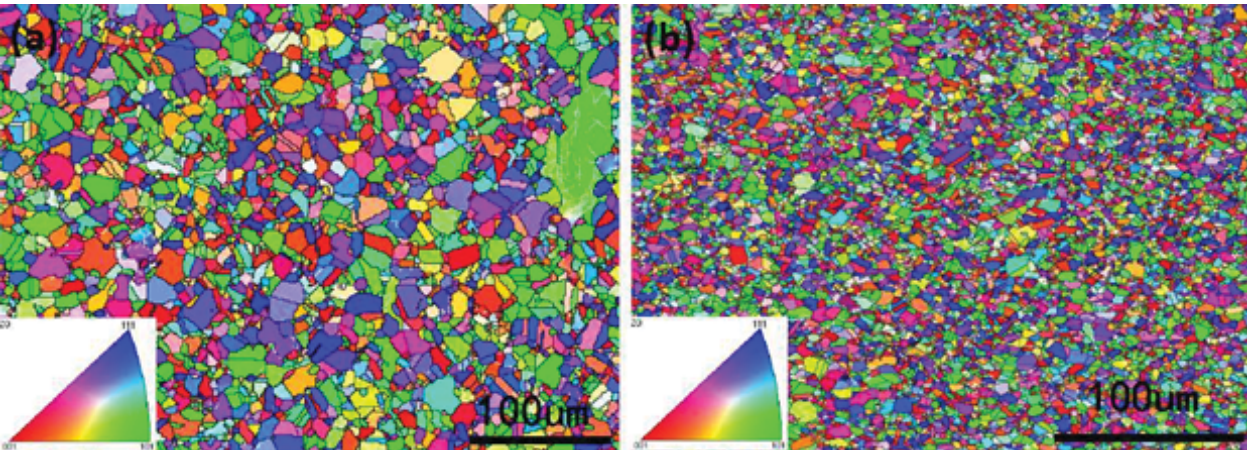


Рис.6. Диаграммы ориентации зерен сплава GH4169 при поперечно-клиновой прокатке образцов без предварительной термической обработки – а) и предварительно состаренным – б)

Морфология эволюции δ -фазы сплава GH4169 при поперечно-клиновой прокатке схожа с эволюцией δ -фазы наблюдаемой при ранее проводимых экспериментах [8] с изотермическим сжатием образца сплава GH4169. Эволюция

δ -фазы от чешуйки до короткого вытянутого элемента и гранулы происходит во время деформации при высокой температуре. Из рис. 8(а) видно, что образец подвергнут одноосному сжатию, в то время как образец при попе-

речно-клиновой прокатке подвергается переменному нагружению. В поперечном сечении и в осевом направлении образца в контакте с инструментом подвергается трехмерному сжатию, в то время как центральная часть образца

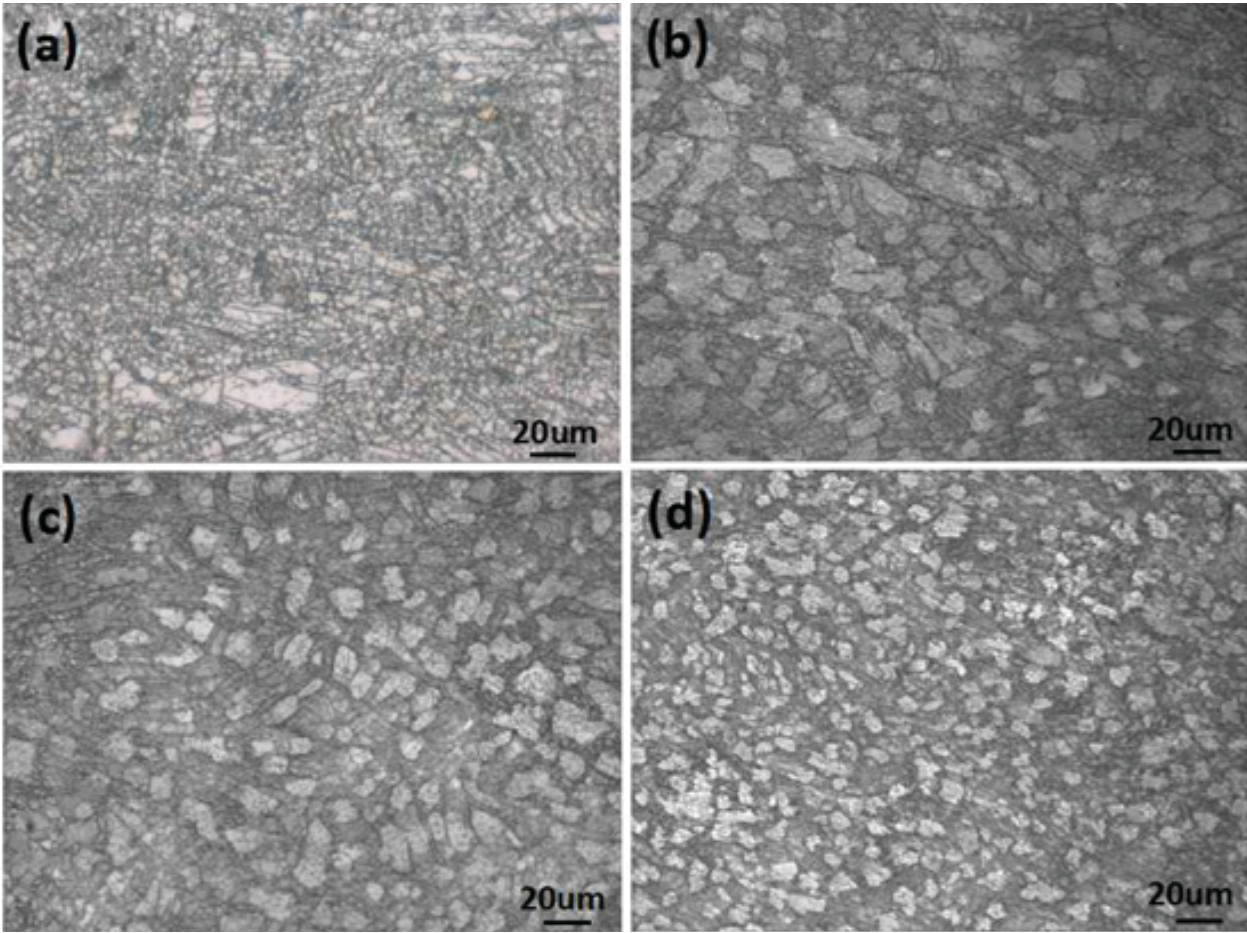


Рис.7. Микроструктура состаренного сплава GH4169 при поперечно-клиновой прокатке с различной степенью обжатия: а) – 30%, б) – 38%, в) – 43%, г) – 50%

подвергнута двумерному растягивающему усилию и постоянному сжатию. С другой стороны, поверхность и сердцевина прокатываемого образца подвергнуты только осевому растягивающему усилию вдоль прокатываемой поверхности, так как δ -фаза и матрица γ -фаза являются некоммутируемым отношением [9], и δ -фаза – твердая и хрупкая фаза относительно матрицы γ -фазы. В непрерывном процессе вращения имеет приоритет матрица γ -фаза, и δ -фаза сложно претерпеть деформацию совместно с γ -фазой. Концентрация напряжений происходит около чешуйчатой δ -фазы, что вызывает изгиб и искривление под эффектом направленного трехмерного переменного нагружения, включая сжимающее, тангенциальное и усилие в осевом направлении. Когда концентрация напряжений достигает предела перелома чешуйчатой δ -фазы, происходит ее разрушение. Кроме того, во время процесса деформации, граница субзерна или область, которая имеет высокую плотность дислокаций в чешуйчатой δ -фазе, увеличатся из-за эффекта деформации, которая может способствовать дроблению чешуйчатой δ -фазы.

Посредством изгиба, кручения и излома при поперечно-клиновой прокатке состаренного сплава GH4169, морфология δ -фазы изменилась от начальной чешуйки до короткого вытянутого элемента или гранулы, и с увеличением степени обжатия δ -фазы гранулы

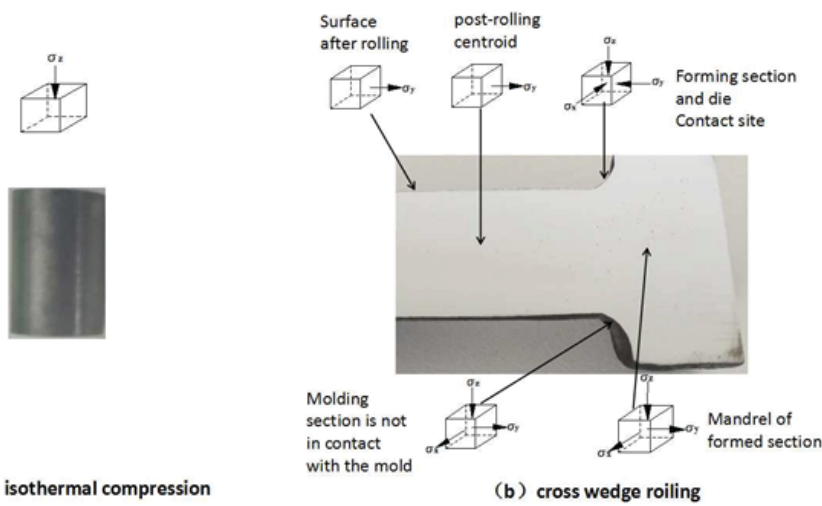


Рис.8. Анализ напряжений в образце подвергнутому изотермическому сдавливанию а) и горячей поперечно-клиновой прокатке б)

стремятся к сферической форме, которая начинает преобладать при степени деформации 50%. Присутствие δ -фазы может способствовать динамической перекристаллизации сплава GH4169 во время поперечно-клиновой прокатки. Эффект скрепления границ зерен тормозит рост повторно кристаллизованного зерна. Динамическая перекристаллизация δ -фазы состаренного сплава GH4169 при поперечно-клиновой прокатке более интенсивна при увеличении степени обжатия прокатываемого образца.

Выводы

Жаропрочный железо-никелевый сплав GH4169 с предвари-

тельно проведенной термической обработкой (старение) подвергнутый горячей поперечно-клиновой прокатке получает структуру, которая в полной мере определяет эксплуатационные свойства конечного изделия. Их можно обозначить как – высокие. Т.к. поперечно-клиновая прокатка обеспечивает достаточно высокую точность, этот процесс стоит рассматривать с точки зрения его интеграции с процессом безоплойной штамповки. В данном случае предварительно прокатанная поковка подается на оснастку дляковки, после чего лопатка практически сформирована, требует минимальной механической обработки, сохраняя при этом требуемую микроструктуру и направление волокон металла.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ning Zhang, Baoyu Wang, Jian Guo Lin, Effect of cross wedge rolling on the microstructure GH4169 alloy // International Journal of Minerals and Metallurgy [J]. - 2012. - P. 836-842.

2. Zhang Ning, Wang Baoyu, Hu Zhenghuan. Thermomechanical coupled numerical simulation of GH4169 alloy for cross wedge rolling // Journal of University of Science and Technology Beijing [J]. - 2011. - 33(11). - P. 1396-1401.

3. Zhu Debiao, Shu Xuedao. Influence of Process Parameters on force and energy parameters of cross wedge rolling GH4169 alloy shaft parts [J] // Journal of Plasticity engineering. - 2018. - 25(1). - P. 52-59.

4. Yan Chen, Hongyan Gan, Shihong Zhang et al. Analysis of deformation and internal defect in flat-wedge cross-wedge rolling of GH4169 superalloy [J] // Materials Science Forum. - 2016. - 879. - P. 324-329.

5. Y.C. Lin, Xian-Yang Wu, Xiao-Min Chen et al. EBSD study of a hot deformed nickel-based superalloy [J] // Journal of Alloy and Compounds. - 2015. - 640. - P. 101-113.

6. Zhang Haiyan, Zhang Shihong, Cheng Ming. Evolution of δ phase in Inconel 718 alloy During Delta Process [J] // ACTA Metallurgica Sinica. - 2009. - 45(12). - P. 1451-1455.

7. Niraj Nayan, N.P. Gurao, S.V.S. Narayana Murty et al. Microstructure and micro-texture evolution during large strain deformation of Inconel alloy IN718 [J]. // Materials Characterization. - 2015. - 110. - P. 236-241.

8. H.Y. Zhang, S.H. Zhang, M. Cheng et al. Deformation characteristics of δ phase in the delta-processed Inconel 718 alloy [J] // Materials characterization. - 2010. - 6. - P. 49-53.

9. Shih-Hsien Chang, In Situ TEM observation of γ' , γ'' and δ precipitations on Inconel 718 superalloy through HIP treatment [J] // Journal of Alloys and Compounds. - 2009. - 486. - P. 716-721.

Статья поступила в редакцию 15.08.2019

ANALYTICAL DESIGN OF A VOLTAGE REGULATOR ACCORDING TO THE CRITERION OF THE GENERALIZED WORK FOR AIRCRAFT BRUSHLESS GENERATOR

A.G. Kapustin – PhD in Engineering sciences, Associate Professor, Professor of the Department of General Professional Disciplines of educational establishment BSAA, Republic of Belarus
kapustin2649@mail.ru

Abstract. The work is devoted to ensuring the required power quality in future electric power systems DC brushless generators. It is shown that to achieve the required quality of electrical power is possible through the implementation of optimal laws regulating the voltage.

Optimal control of the voltage synthesized by the method of analytical design of controllers according to the criterion of the generalized work. For this purpose, a mathematical model of permanent magnet synchronous generator, taking into account the saturation of the magnetic circuit, the change of the rotational speed and load, as well as lasting processes the switching valves of the generator.

The algorithm of the search engine optimal coefficients of the minimized functional.

In MatLab mathematical modeling of transients of the generator when switching a load. It is shown that application of the synthesized law provide power quality, better than regulatory requirements.

Keywords: analytical construction, generator, voltage regulator, minimized functional, regulation law, quality of electric energy, optimal law.

Increasing the requirements for the quality of electric energy in the power supply systems of promising aircraft, for example, the concept of All electric aircraft, determines the solution to the problems of optimal design of voltage regulators for alternating and alternating current generators [1].

For a promising power supply system, we consider the application of the method of analytical design of controllers according to the generalized operation criterion for an aircraft valve generator [2,3]. The gate generator is a combination of a synchronous generator with asymmetric three-phase armature windings and two Lariionov circuits (AC to DC rectifier, working in

parallel) [2,3].

The synchronous generator is represented in the coordinate system d, q , rigidly connected with the rotor by Park-Gorev equations [4,5]:

$$U_d = -r_c \cdot i_d - p\omega\psi_q + d\psi_d/dt \quad (1)$$

$$U_q = -r_c \cdot i_q - p\omega\psi_d + d\psi_q/dt \quad (2)$$

$$U_d = r_f j_f + d\psi_f/dt \quad (3)$$

$$U_{fw} k_{fw} = T_{fw} \cdot di_{fw}/dt + i_{fw} \quad (4)$$

where

$$\psi_d = -L_{cs} i_d + E_0 k(p\omega_0)^{-1} \quad (5)$$

$$\psi_q = -L_{aq} i_q - L_q i_q \quad (6)$$

$$\psi_f = L_{fs} i_f + E_0 k(k_f p\omega_0)^{-1} \quad (7)$$

Here $k=\omega/\omega_0$ – coefficient taking into account the change in the rotor

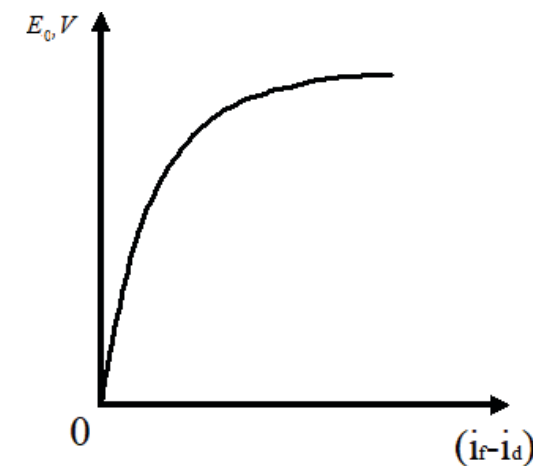


Fig.1. Load characteristic of the generator

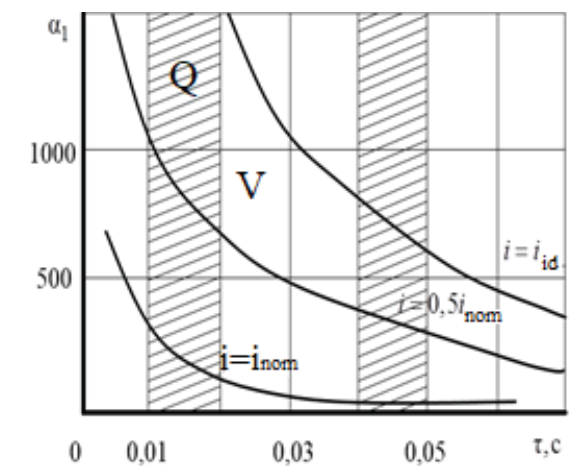


Fig.2. Change in the coefficient of switching load

speed of the generator; $E_0 = E(i_f, i_d)$ – generator load characteristic at speed $\omega_0 = 628 \text{ s}^{-1}$ (Fig. 1). The non-linearity of the load characteristic is due to the magnetization of the magnetic circuit of the generator. In analytical form, this characteristic can be represented only by approximation [3,4].

The voltage at the output of the uncontrolled rectifier of the generator, taking into account the influence of processes of continuous switching of the valves, is written in the form [3]:

$$U_{f,av} = U_{f,m} \frac{m_r}{\pi} \sin \frac{\pi}{m_r} \left(1 - (2\pi f L_{cs} I_l) / (U_{f,m} \sin(\pi/m_r)) \right) \quad (8)$$

where $U_{f,m} = \sqrt{3} U$ – for bridge rectification schemes:

$$U = \sqrt{U_d^2 + U_q^2} \quad (9)$$

m_r – the number of ripples of the rectified voltage for the period;

L_{cs} – armature winding dissipation inductance;

f – generator current frequency;

I_l – generator load current.

We write the load equations of the valve generator as:

– on the direct current side

$$U_{f,av} = I_l R_l \quad (10)$$

– on the alternating current side $U_d = i_d R_s$ (11)

$$U_q = i_q R_s \quad (12)$$

Here $R_s = (6R_l(R_l + 2m_r f L_{cs} k)) / \{ [m_r \pi \sin(\pi/m_r)]^2 (R_l - 2m_r f L_{cs} k) \}$ –

equivalent load resistance of a synchronous generator, taking into account the processes of continuous switching valves and load R_l resistance to direct current [3].

System of equations (1) – (12) presents a mathematical model of a valve generator that takes into account saturation of the generator magnetic circuit, a change in the frequency of rotation of the aircraft engine, load, and the influence of processes of continuous switching of valves [3].

The analysis of the mathematical model shows that it does not satisfy the conditions of the method of analytical design of controllers according to the criterion of generalized work [2,3,4]. In particular, the dependence $E_0 = E(i_f, i_d)$ is not represented by a function differentiable at any point in the region of variation of the valve generator operating modes; the model is not recorded in normal Cauchy form.

To satisfy the first condition, the dependence $E_0 = E(i_f, i_d)$ approximated by an exponential function of the form:

$$E_0 = c_1 [1 - \exp(-(c_2 i_f - c_3 i_d)/c_3)] \quad (13)$$

where c_2, c_3 – coefficients depending on the parameters of the generator; c_1, c_3 – approximation coefficients.

Then, taking into account (13), solving (1) – (9) together with the load equations (10) – (12), we can imagine a mathematical model of a valve generator in normal Cauchy form [3]:

$$di_d/dt + F_1 = 0 \quad (14)$$

$$di_q/dt + F_2 = 0 \quad (15)$$

$$di_f/dt + F_3 = 0 \quad (16)$$

$$di_{fw}/dt + F_4 = \varphi_{41} U_{fw} \quad (17)$$

where U_{fw} – exciter voltage of the exciter of the generator, which is the control action;

F_1, F_2, F_3, F_4 – functions dependent on generator parameters:

$$F_1 = -(\varphi_2 \varphi_3 \psi_2 + \psi_1) \varphi^{-1};$$

$$F_2 = -\psi_3 \psi_4^{-1};$$

$$F_3 = -(\varphi_1 \psi_1 + \varphi_2 \varphi_4 \psi_2) \varphi^{-1};$$

$$F_4 = i_{fw} T_{fw}^{-1};$$

$$\varphi_{41} = k_{fw} T_{fw}^{-1};$$

(moreover $\varphi_1 = a_1 + a_3 (k\Phi)^{-1}$; $\varphi_2 = a_2 (k\Phi)^{-1}$; $\varphi_3 = L_{fs} + a_4 k\Phi$; $\varphi_4 = k a_s$; $\varphi = \varphi_1 \varphi_3 - \varphi_4$);

$\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$ – winding flux linkage:

$$\psi_1 = U_f - r_f i_f;$$

$$\psi_2 = -r_c i_d + p\omega(2,154 L_{aq} + L_q) i_d - U_d;$$

$$\psi_3 = -r_c i_q - p\omega L_{cs} i_d + k E_0 - U_q;$$

$$\psi_4 = 2,154 L_{aq} + L_q;$$

a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 – generator coefficient design

$$a_1 = c_3 c_2^{-1};$$

$$a_2 = p\omega_0 c_2^{-1};$$

$$a_3 = a_2 L_{cs};$$

$$a_4 = a_2 (p\omega_0 k_f)^{-1};$$

$$a_5 = a_3 (p\omega_0 k_f)^{-1};$$

$\Phi = (c_1 - E_0) c_3^{-1}$ – excitation system

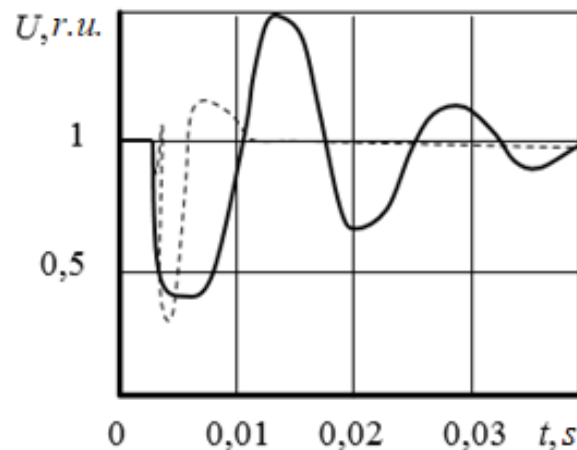


Fig.3. Voltage transient curves with nominal load surge

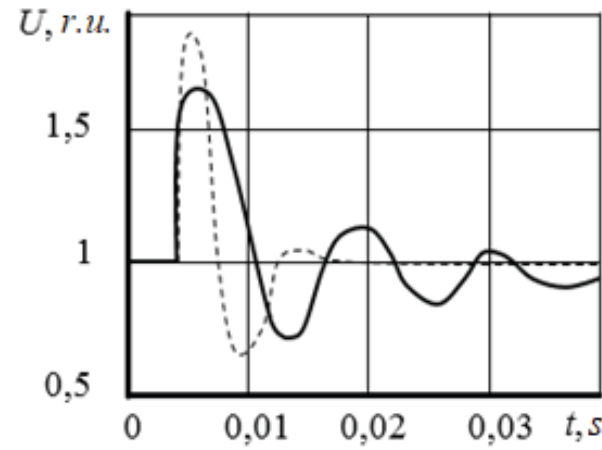


Fig.4. Voltage transient curves during discharge of rated load

magnetic flux;
 $E_0 = c_1 \{1 - \exp[-(c_2 i_f - c_3 i_d) c_5^{-1}]\}$ – generator load characteristic.

In accordance with the method of analytical design of controllers according to the criterion of generalized work [2,6], optimal in the sense of a minimum of functional

$$I = V_3[x(t_2)] + \int_{t_1}^{t_2} Q(x, t) dt + 0.5 \sum_{j=1}^m \int_{t_1}^{t_2} (U_j / k_j)^2 dt + 0.5 \sum_{j=1}^m \int_{t_1}^t \left(k_j \sum_{k=1}^n \Phi_{k,j} \frac{\partial V}{\partial x_k} \right)^2 dt \quad (18)$$

are management

$$U_j = -k_j^2 \sum_{k=1}^n \Phi_{k,j} \frac{\partial V}{\partial x_k} \quad (19)$$

where V – solution of a linear partial differential equation [2,6]

$$V = V_3 + \sum_{v=1}^{\infty} \frac{\tau^v}{v!} L^{v-1} (L V_3 + Q) \quad (20)$$

under the boundary condition $V(t_2) = V_3[x(t_2)]$.

Here Q, V_3 – defined positively defined functions;

$$L = -\sum_{i=1}^n F_i \frac{\partial}{\partial x_i} \text{ – linear differential operator.}$$

The task of synthesizing the optimal voltage regulator for an aircraft valve generator is nonterminal. In the framework of the method under consideration, nonterminal controls for the valve generator are obtained by using the moving time interval and the moving boundary condition in functional (18)

$$V(t+\tau) = V_3[x(t+\tau)] = 0 \quad (22)$$

In this case, we write functional (18) as:

$$I = \int_t^{t+\tau} \alpha_1 (U_{f,av} - U_{f,nom})^2 dt + 0.5 \int_t^{t+\tau} (U_{fw} / k_1)^2 dt + 0.5 \int_t^{t+\tau} \left(k_1 \Phi_{41} \frac{\partial V}{\partial i_{fw}} \right)^2 dt \quad (23)$$

where α_1 – “weight” functional coefficient.

Truncated optimal controls, taking into account three iterations of expression (20) and boundary condition (22), minimizing functional (23), have the form [2]:

$$U_{fw} = -k_1^2 \Phi_{41} \frac{\partial V}{\partial i_{fw}} \quad (24)$$

where

$$V = \tau Q + 0.5 \tau^2 L Q, \quad (25)$$

$$Q = \alpha_1 (U_{f,av} - U_{f,nom})^2 \quad (26)$$

Substituting (26) into (25) and differentiating with respect to the corresponding variables, we obtain the optimal control of the voltage of the valve generator in the form of the following dependence

$$U_{fw} = -g(U_{f,av} - U_{f,nom}) \quad (27)$$

under restrictions

$$0 \leq U_{fw} \leq U_{fw,max} \quad (28)$$

due to the power and external characteristics of the exciter, where

$$g = -k_1^2 \tau^2 \alpha_1 \cdot (1,464 k_{fw} k_{cs} R_s^2) / (\Phi T_{fw} (U + 2,673 k \omega L_{cs} I_1))$$

The dependence of the coefficient α_1 on the time of optimization of the transient process τ for a given accuracy of voltage regulation in static operating modes (5%) is shown in Fig. 2.

Fig. 2 shows that in order to obtain a transient time of voltage of not more than 0.05 s (established by

GOST R 54074-2017), the “weight” coefficient of the minimized functional (23) must be taken within its variation in region B. To determine the effectiveness of the synthesized control, a mathematical model of the valve generator and the synthesized controller in the mathematical modeling environment MatLab was developed.

According to calculations on a digital computer, it was found that the best quality of voltage regulation with control (27) and restriction (28) is achieved for α_1 at the same value as its lowest value α_{min} , which this coefficient takes at the nominal operating mode of the generator ($\omega = \omega_0, I_1 = I_{1,nom}$).

Fig. 3 and 4 show the curves (dashed lines) of transients in voltage during a surge (Fig. 3) and discharge (Fig. 4) of the rated generator load with control (27) at $\omega = \text{const}$ and $\alpha_1 = \alpha_{min}$. Curves (solid lines) also show voltage transients during operation of a valve generator with a serial semiconductor voltage regulator (for switching the same load).

From the figures it follows that the process of changing the voltage at the load is established in time $\tau \leq 0,005$ s, but its significant oscillation is observed, due to the high gain in the law (27).

A further improvement in the quality of electric energy can be achieved by introducing into functional (23), in addition to the quadratic integral estimate of the voltage deviation, a similar estimate of the exciter current [2,4,6]. Then, an additional term appears in functional (23), taking into account the action of the current i_{bb} , and in expression (26), an additional “weight” coefficient α_2 appears.

Thus, in the general case, for the practical implementation of the laws of regulating the voltage of generators synthesized by the analytical construction of regulators by the criterion of generalized work (ACGW), it is necessary to determine the optimal, in the sense of minimized functional, weight coefficients [2, 4, 6]. For well-known reasons, a general methodology for finding the optimal values of these coefficients has not been developed [2, 4, 6]. For a valve generator, this circumstance is primarily due to the fact that the law of voltage

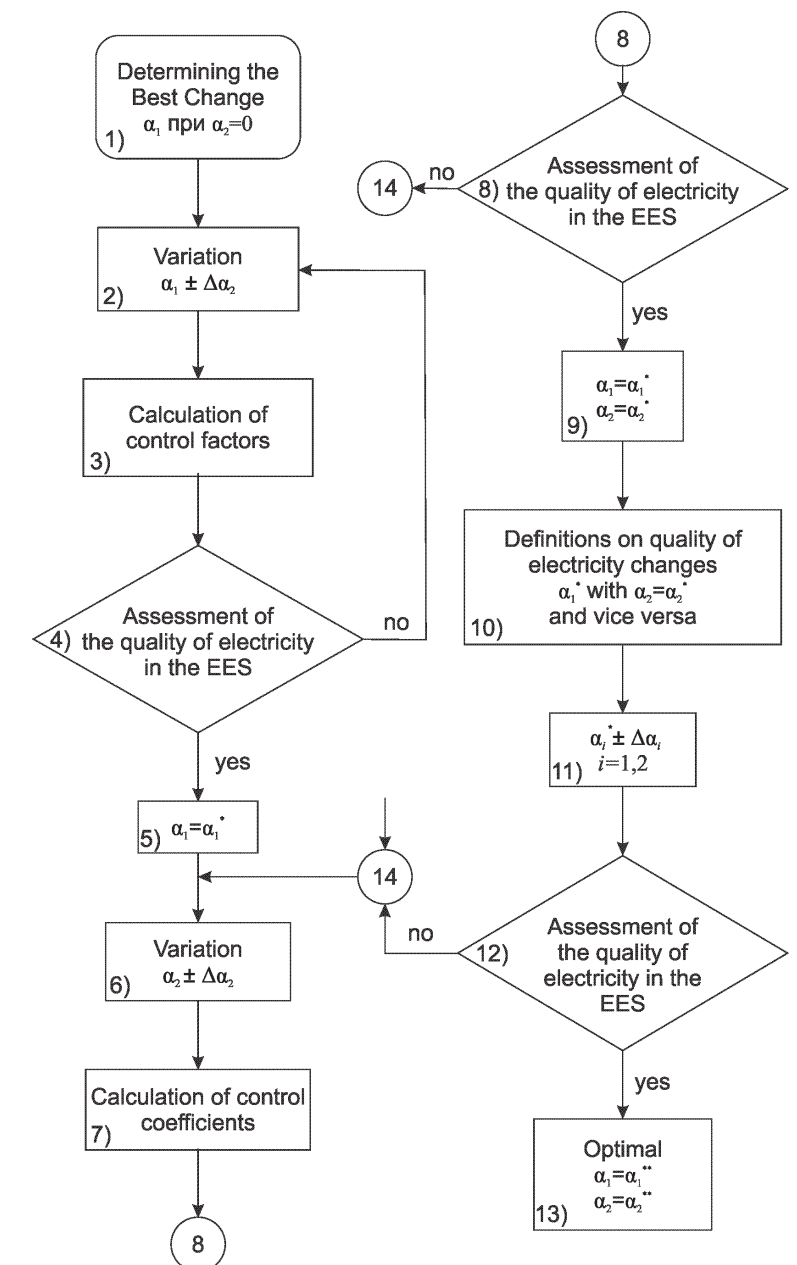


Fig.5. Diagram of the search algorithm for the optimal “weight” coefficients

regulation optimal in the sense of minimized functionality may not be optimal in the sense of power quality indicators. To coordinate the optimality of the minimized functionality and indicators of the quality of electricity, a large, voluminous work is required, which often does not allow to fully evaluate the effectiveness of the synthesized controllers. To minimize costs in solving this problem, we propose an algorithm for machine search of optimal, in the sense of a given criterion, indicators of electric power

quality, weight coefficients ($\alpha_i, i = \overline{1, n}$) of the minimized functional. The block diagram of the algorithm is shown in Fig. 5. The essence of the sequence of operations of the algorithm is reduced to the fact that first the ACGW method determines the optimal structure of the voltage regulator [2,4,6]. Then, inside this optimal structure, the directional search method determines the values of the coefficients of the minimized functional at which the best (optimal) indicators of electric power quality are provided. As a

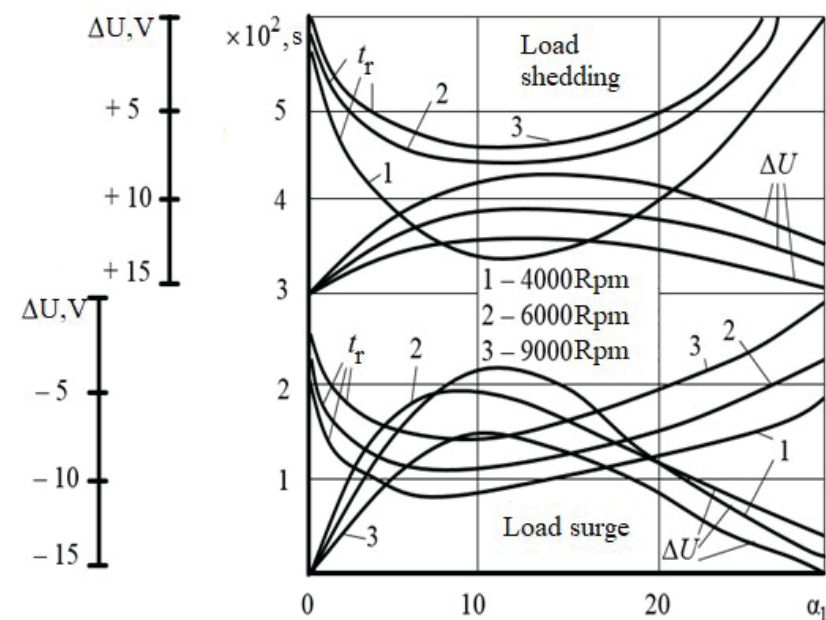


Fig. 6. Dependences of the quality indicators pf electric power with variation α_1

result, the law of voltage regulation, synthesized by the ACGW method, is optimal both in relation to the minimized functional and in relation to indicators of the quality of electricity.

Fig. 6 and 7 show the dependences of electric power quality indicators (t_r – control time, ΔU – reduced transient voltage values) with variations obtained using a digital computer.

The results of these studies allow us to determine the optimum indicators of the quality of electricity, depending on the coefficients α_i of the minimized

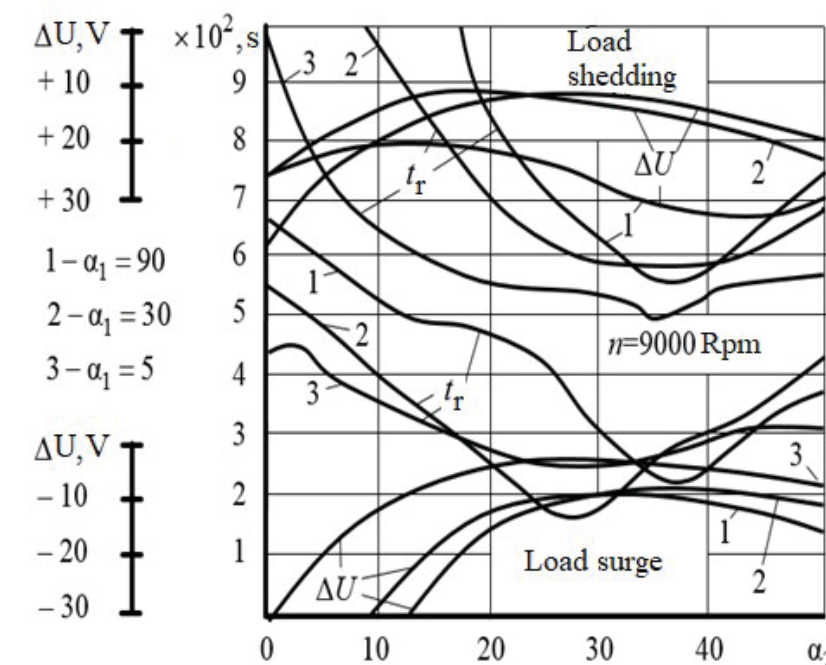


Fig. 7. Dependences of the quality indicators pf electric power with variation α_2

functional. For a control system with a 20 kVA valve generator, optimal indicators of electric power quality (in the sense of a given minimized functional) are achieved with $\alpha_1=5,014$ and $\alpha_2=30,127$ (Fig. 6 and 7). The results of modeling transient processes of the generator with the indicated coefficients are shown in Fig. 3 and 4 (dashed curves).

Conclusion.

Thus, the implementation of the proposed algorithm on a computer allows us to formalize the procedures for selecting the optimal structure and parameters of the synthesized laws of voltage regulation in accordance with the indicators of electric power quality of aircraft power supply systems of interest to us.

REFERENCES

1. Kapustin, A.G. Prospects for the development of modern aircraft power supply systems: International Military – Scientific Conference MA RB. Modern military – technical policy: problems and prospects. Abstracts of reports. Minsk: Military Academy of the Republic of Belarus, 2013. – 429 p.
2. Kapustin, A.G. Analytical design of a voltage regulator for an aviation valve DC generator. 12th International Conference "Aviation and Cosmonautics – 2013". November 12-15, 2013. Moscow. Abstracts. – SPb.: Printing Workshop, 2013. – 646 p.
3. Kapustin, A. G. Improving the quality of electricity in autonomous power supply systems of promising aircraft / A. G. Kapustin, N. S. Karnaukhov // Bulletin of the Gomel State Technical University named after P.O. Sukhoi. – 2016. – 1 (64). – P. 61–66.
4. Kapustin, A. G. On the errors of normal performance when simplifying the mathematical model of a contactless direct current generator / A.G. Kapustin, N.S. Karnaukhov, S.V. Sizikov // Journal of SC VRO RAKTS. Voronezh. – 2016 – № 4 – P.34 – 38.
5. Adkins, B. The General Theory of Electric Machines. – Moscow, HEI. 1960. – 272 p.
6. Krasovsky, A.A. Universal algorithms for optimal control of continuous processes / A.A. Krasovsky, V.N. Bukov, V.S. Shendrik. – Moscow, Science. 1977. – 420 p.

Статья поступила в редакцию
10.12.2019

УДК 620.19

А. НАУМОВ, М. ФИЛИПОВА

ДЕФЕКТОСКОПИЯ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ШЕРОГРАФИИ

Александр Викторович Наумов – кандидат химических наук, доцент кафедры «Прочность конструкции» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования КНИТУ-КАИ, Российская Федерация
nalexvi@mail.ru

Мария Сергеевна Филиппова – инженер инженерингового центра «КАИ-Композит» КНИТУ-КАИ, аспирант кафедры «Стандартизации, сертификации и технологического менеджмента» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования КНИТУ-КАИ, Российская Федерация
lukankina.mariya@mail.ru

Аннотация. В работе рассматривается возможность применения метода шерографии в качестве метода неразрушающего контроля композиционных материалов. На основе экспериментальной работы по апробированию шерографии на образцах из композитных материалов показано, что метод позволяет эффективно выявлять структуру конструкции и типовые внутренние дефекты, присущие изделиям из композитов
Ключевые слова: Композиционные материалы, дефектоскопия, шерография, образец, дефект

Повсеместное распространение композиционных материалов (КМ) требует постоянного совершенствования и внедрение новых, более производительных и точных методов неразрушающего контроля качества формирования и сборки конструкций из КМ и их диагностики в процессе эксплуатации изделий. Последнее предъявляет требования к компактности и мобильности оборудования для возможности оперативного контроля при плановом или экстренном техническом обслуживании конструкции.

К традиционным методам неразрушающего контроля изделий из КМ относятся: акустические (в частности, ультразвуковые), радиационные, магнитные, визуально-оптические, тепловые и др. Каждый из вышеуказанных методов имеет преимущества и недостатки, свою область применения, которая определяется чувствительностью и точностью обнаружения дефектов, необхо-

димостью и сложностью калибровки, но ни один из них не является универсальным.

В последние годы новый виток развития и распространения получает метод неразрушающего контроля – цифровая шерография [1-6].

В соответствии с [7], шерография – это метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации интерференционных изображений локальных перемещений поверхности объекта контроля до и после приложения внешнего возмущающего воздействия, предназначенный для выявления нарушений однородности, для контроля изменений в материале объекта контроля, структурных дефектов по всему объему контролируемого участка (в пределах области чувствительности прибора).

Принципиальная схема контроля методом шерографии представлена на рис. 1 [8].

Объект контроля 1 засвечи-

вают рассеянным лазерным излучением с фиксированной частотой. Приемник отраженного излучения, ССД-камера 2, регистрирует его с помощью ССД-матрицы или иных светочувствительных элементов. Сдвиговая оптика 3 (как правило, система зеркал с возможностью изменения наклона) формирует два смещенных изображения поверхности объекта контроля. Световые лучи, отраженные от пары точек поверхности объекта контроля фокусируются в одну точку ССД-матрицы, образуя интерференционную спекл-структуру, которая с помощью устройства захвата изображений 4 вводится в компьютер 5.

Полученные микроинтерференционные спекл-структуры, записанные для двух состояний объекта (до и после незначительного нагружения), сравниваются и обрабатываются с целью получения макроинтерференционной картины полос, которая содержит

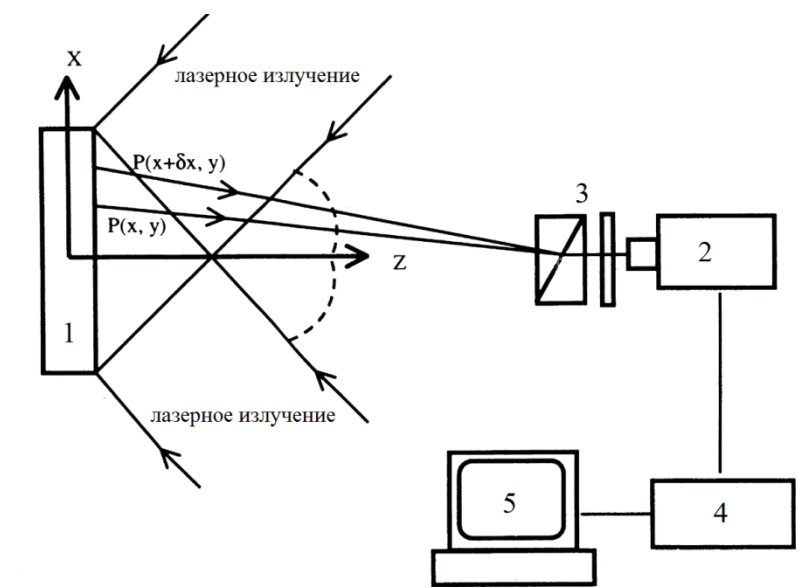


Рис.1. Оптическая схема цифровой шерографии
1 - объект контроля; 2 - CCD-камера; 3 - сдвиговая оптика; 4 – устройство захвата изображений; 5 – компьютер со специальным программным обеспечением

информацию о производных от компонент вектора перемещений точек поверхности ($\Delta\phi$). Таким образом, по отношению ко всем точкам поверхности объекта контроля возникает интерференция в каждой из спаренных точек по всей зоне видимости.
Если направление смещения изображений совмещено с опорной осью x , а количественно величину смещения обозначить δx , фазовые интерференционные полосы описываются следующим выражением [8]:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \left[A_1 \frac{\partial u}{\partial x} + A_2 \frac{\partial v}{\partial x} + A_3 \frac{\partial w}{\partial x} \right] \delta x$$

где λ – длина волны используемого лазера;
(A_1, A_2, A_3) – системные параметры, связанные с оптическим устройством;
(u, v) – компоненты смещения в плоскости вдоль оси отсчета x и y соответственно;
 w – смещение вне плоскости компонент вдоль оси отсчета z ;
($\partial u/\partial x, \partial v/\partial x, \partial w/\partial x$) – градиенты смещения вдоль направления

сдвига изображений x .
В качестве примера на рис. 2 приведен результат шерографии с выявлением дефекта обшивки панели крыла беспилотного летательного аппарата в виде «шерограмм» – изображений, характеризующих деформацию поверхности.
При выполнении исследований данных использована компактная шерографическая мобильная система ISISmobile 3100 с программным обеспечением FRINGES (рис. 3), основные параметры которой приведены в таблице.
В качестве объектов исследования были выбраны типовые конструкции из КМ, применяемые в авиационных узлах и деталях:
• монолитные образцы из углепластика;
• многослойные конструкции с обшивками из КМ и сотовым наполнителем.
Для проведения исследования возможности применения шерографии при анализе монолитных деталей из КМ использовались экспериментальные монолитные образцы из углепластика в виде квадратных пластин со стороной 90 мм и толщиной 6 мм. В них на глубине 3 мм были специально заложены внутренние дефекты, имитирующие металлические (стальная стружка) и неметаллические включения (фторопласт), различных размеров. Шерограммы образцов при-

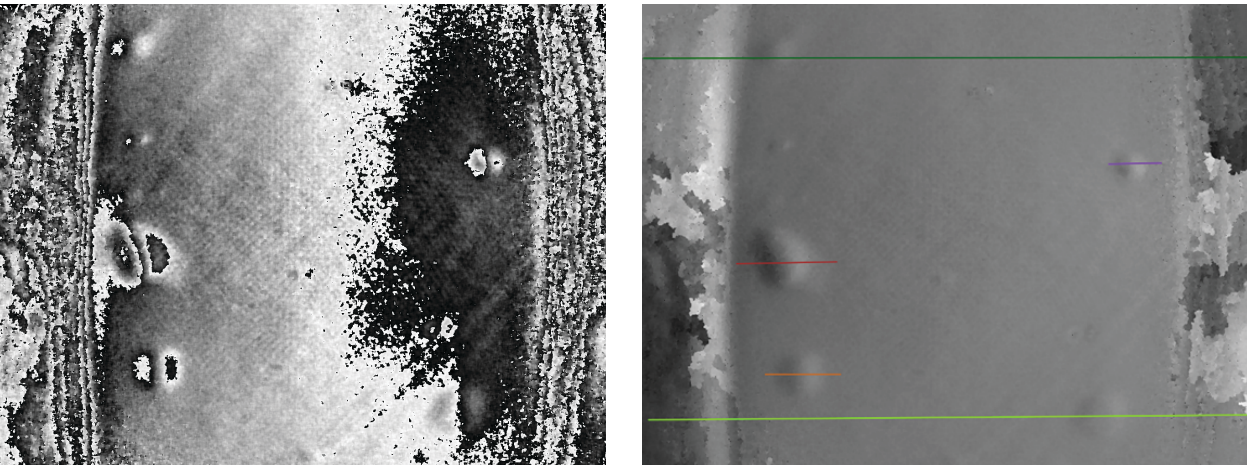


Рис.2. Результаты шерографического контроля качества обшивки панели крыла беспилотного летательного аппарата – шерограммы отдельной зоны контроля, полученные при термическом нагружении на стадии охлаждения

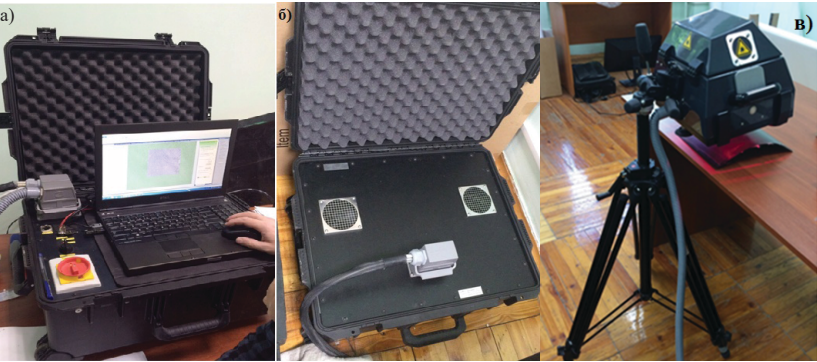


Рис.3. Шерографическая мобильная система ISISmobile 3100:
а) электронный бокс с контроллером, б) бокс вакуумного насоса, в) сканирующий модуль на штативе

Таблица. Основные технические характеристики шерографической мобильной системы ISISmobile 3100	
Наименование параметра	Технические параметры
Инспектируемая зона, мм2	220 x 185
Разрешение камеры, пикселей	1.4 Мпикс.; 1280 x 1024 пикселей
Длина волны лазера, нм	660 нм
Мощность лазера, мВт	70
Тип лазерных диодов	IMM-CD632E
Количество лазерных диодов, шт	4
Количество ламп нагрева, шт	2 (спаренные)
Чувствительность, нм	30
Время получения готового результата инспектирования одной зоны, сек.	от 10 до 50 (в зависимости от длительности внешнего воздействия и типа применяемых фильтров постобработки)
Класс лазера	2 (закрытая система); рассеянное излучение
Операционная система	Windows 7 Professional
Вид нагрузки	термальная; вакуумная
Программное обеспечение	ISISplus, FRINGES
Габариты сканирующего модуля, мм	420 x 280 x 310
Длина кабеля сенсорного модуля, м	10
Источник питания	110-230 В; однофазный; 50-60 Гц; 16 А
Масса измерительной установки, кг	6

ведены на рис. 4 и рис. 5.
В результате шерографического контроля образцов ламинатов с применением теплового воздействия были выявлены имитаторы неметаллического и металлического включений с диаметрами более 1,5 мм. Не были выявлены имитаторы включений с размером менее 1 мм.
Для оценки возможностей контроля многослойных конструкций методом шерографии были изготовлены образцы с несущими слоями из углепластика и сотовым наполнителем из бумаги Nomex с толщиной 10 мм, в которых заложены дефекты:
• образец 1 с нарушением целостности обшивки (рис. 6 (а));
• образец 2 с отсутствием части наполнителя (рис. 6 (б)).
Шерографический контроль с применением теплового воздействия выявил дефекты обшивки и наполнителя, зафиксированные на шерограммах (рис. 7). Так же на шерограммах отображаются ячейки сотового сотовласта, как отклик клеевого шва между обшивкой и наполнителем.
Приведенные результаты шерографического контроля образцов КМ позволили применить метод шерографии для диагностики многослойных конструкций, применяемых в элементах термозащиты летательных аппаратов. Как правило, подобная многослойная конструкция состоит из трехслойной сотовой панели 1 с обшивками из углепластика и наполнителем из бумаги Nomex с толщиной до 30 мм и армированного пенопласта 2 толщиной 50 мм (рис. 8). Контроль представленной конструкции включает следующие этапы:
Этап 1. Контроль клеевого шва между внешней обшивкой трехслойной панели 1 и её сотовым наполнителем (рис.8, область контроля 1);
Этап 2. Контроль клеевого шва между внутренней обшивкой и армированным пенопластом (рис.8, область контроля 2);
Этап 3. Контроль со стороны армированного пенопласта (рис.8, область контроля 3).
Результаты шерографического исследования, полученные при тепловом воздействии, показали,

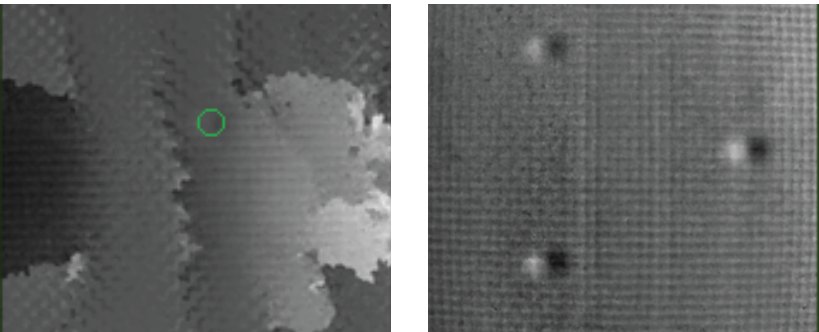


Рис.4. Шерограммы монолитных образцов из углепластика с имитатором неметаллического включения:
а) размер заложенного дефекта – 1,5 мм; б) размер заложенного дефекта – 2 мм

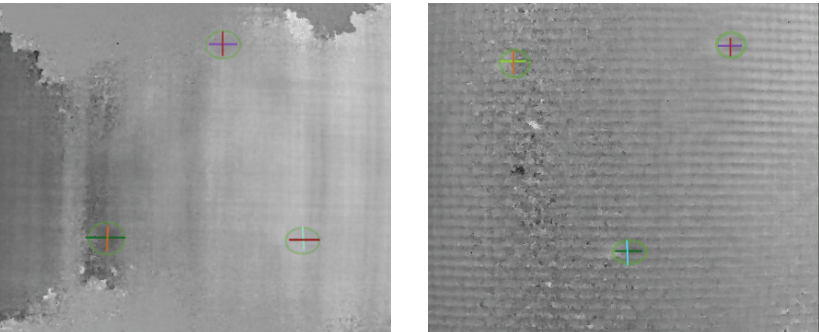


Рис.5. Шерограммы монолитных образцов из углепластика с имитатором металлического включения:
а) размер заложенного дефекта – 1,5 мм; б) размер заложенного дефекта – 2 мм

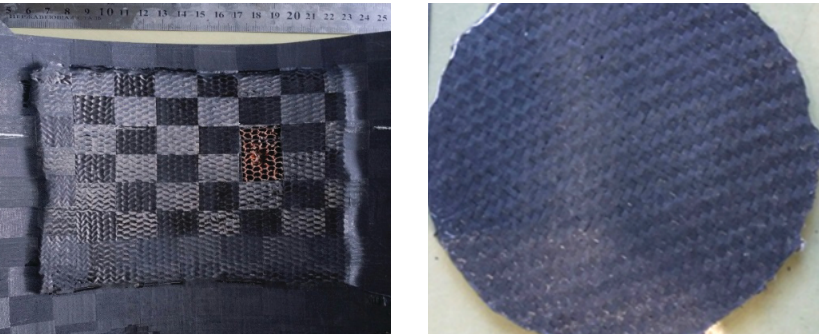


Рис.6. Фотографии образцов с дефектами

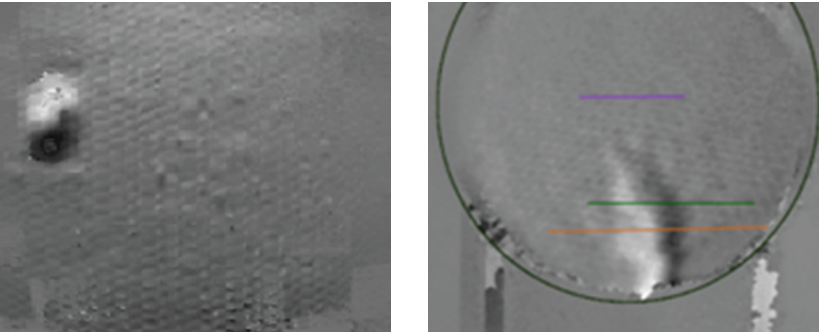


Рис.7. Шерограммы контроля трехслойных образцов, полученные при тепловом воздействии

что на этапе контроля 1 выявляется структура сотового заполнителя, а дефекты типа непрочности, замятия заполнителя и др. отсутствуют (рис.9). На этапе контроля 2 в результате проявления структуры сотового заполнителя дефектов не выявлено (рис.10). При этом не удалось зафиксировать структуру армирования пенопласта, но четко прослеживается требуемое качество клеевого шва в зоне склейки трехслойной панели и армированного пенопласта.

На этапе контроля 3 структуры армированного пенопласта дефекты типа нарушения сплошности и замятий заполнителя, посторонних включений и др. не обнаружены.

Выводы

Проведенные исследования образцов материалов из КМ и многослойных конструкций из КМ показали эффективность применения метода шерографии для выявления различных дефектов, таких как посторонние включения, непрочности, дефекты заполнителя и др., а так же перспективные направления применения шерографии в качестве метода неразрушающего контроля при производстве и эксплуатации изделий из КМ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Bobko, Yu. A., Sinchugov, I. S. Application of the scherography method for flaw detection of products from composite materials / Yu. A. Bobko, I. S. Sinchugov // NDTWorld. – 2016. - v. 19, no. 4. – P. 4–7
2. John W. NEWMAN Aerospace NDT with Advanced Laser Shearography / W. John // 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28 Oct 2008, Shanghai, China
3. Hung, Y.Y. Applications of digital shearography for testing of composite structures / Y.Y. Hung // Composites: Part B 30 (1999). – P. 765–773
4. Lianxiang, Yang. Handbook of Advanced Nondestructive Evaluation / Yang Lianxiang, Li Junrui // Shearography. – P. 383-419

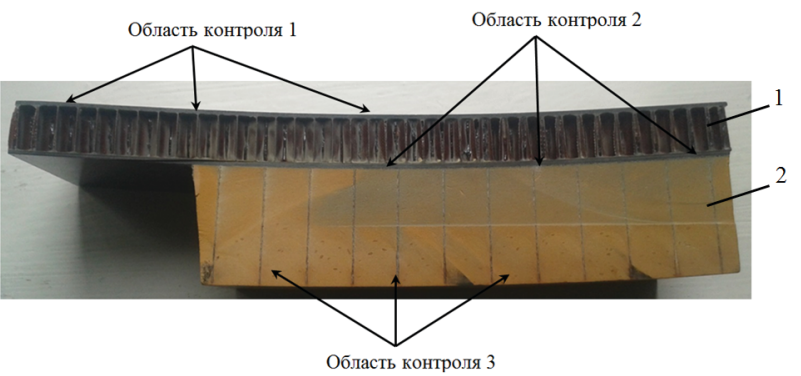


Рис.8. Фотография многослойной конструкции и схема проведения контроля

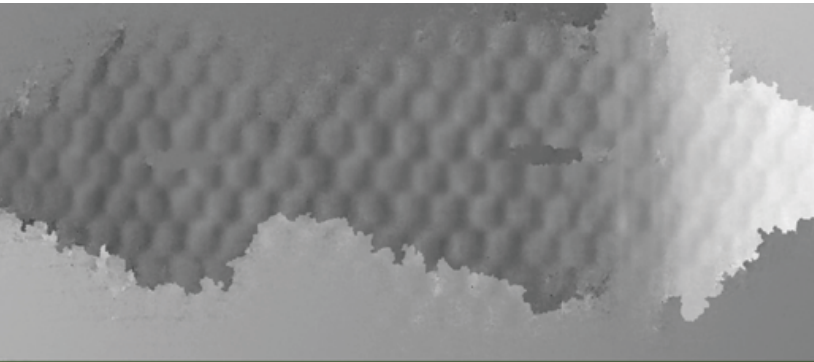


Рис.9. Шерограмма области контроля 1

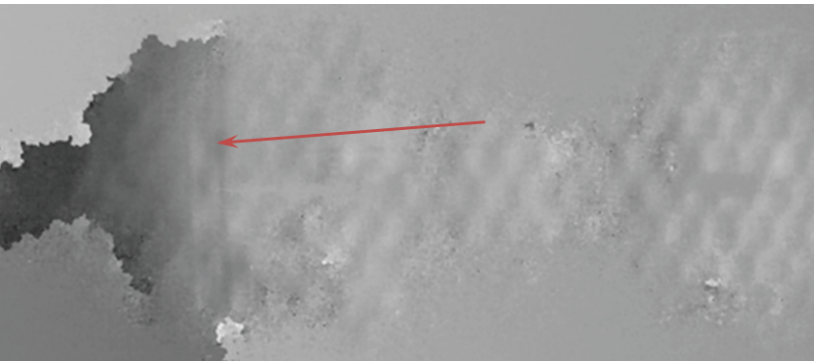


Рис.10. Шерограмма области контроля 2

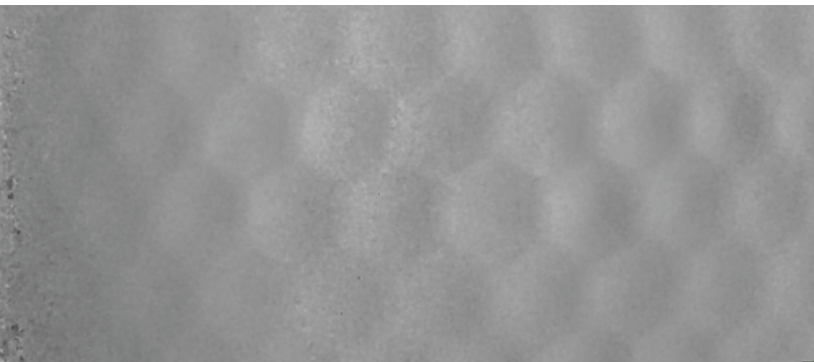


Рис.11. Шерограмма области контроля 3

5. Wolfgang, J. Bisle. Phase Stepping Shearography for Testing Commercial Aircraft Structures: An Application Review of Advanced Image Processing Techniques for Shearography / Wolfgang, J. Bisle, Dieter Scherling, Gustav Tober // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. – P. 665-672
6. Лобанов, Л. М. Технология неразрушающего контроля качества элементов и узлов авиационных конструкций методом электронной шерографии / Л.М. Лобанов [и др.] // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2014. – №3. – С. 15-19
7. Композиты полимерные. Шерография полимерных композитов, материалов внутреннего слоя "сэндвич"-конструкций и изготовленных намоткой сосудов, работающих под давлением: ГОСТ Р 56795-2015. – введ. 01-01.2017 – М.: Стандартинформ, 2016. – 23 с.
8. Hung, Y. Y. In-Situ Non-Destructive Evaluation of Concrete Structures Using Shearography / Y. Y. Hung, L. Liu, Y. H. Huang // Experimental Analysis of Nano and Engineering Materials and Structures. – P. 323-324

Статья поступила в редакцию
10.12.2019

УДК 621.391.26

В. ТУЗЛУКОВ

АДАПТИВНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ В УСЛОВИЯХ РЭЛЕЕВСКИХ ЗАМИРАНИЙ

Вячеслав Петрович Тузлуков – кандидат физико-математических наук, заведующий кафедры технической эксплуатации авиационного и радиоэлектронного оборудования учреждения образования БГАА, Республика Беларусь
slava.tuzlukov@mail.ru

Аннотация. В настоящей работе представлен новый подход к адаптивному формированию диаграммы направленности передающей антенны при передаче сигнала от беспилотного летательного аппарата (БПЛА) к мобильной станции в условиях быстрых рэлеевских замираний. При этом подходе система направленных передающих антенн БПЛА формирует диаграммы направленности в соответствии с предсказанными характеристиками нисходящего канала при передаче данных от БПЛА к мобильной станции. Прогнозирование параметров нисходящего канала представляет собой линейное прогнозирование на основе авторегрессионной модели с пониженной частотой дискретизации с целью расширения временного интервала для запоминания данных, заданного фиксированным порядком авторегрессионной модели. Для широкополосного множественного доступа с кодовым разделением сигналов (W-CDMA) при передаче данных по нисходящему каналу используется многолучевое разнесение сигналов для получения требуемого коэффициента усиления при разнесенном приеме. В частности, для уменьшения взаимных и собственных помех предлагается сочетание псевдоинверсно направленных сигналов с предварительным многолучевым разнесением. Веса функции диаграммы направленности передающих антенн при многолучевом распространении сигналов корректируется в пределах длительности пакета передаваемых данных по нисходящему каналу с целью компенсации прогнозируемых замираний. В настоящей работе определяются показатели прогнозирования и характеристики формирования диаграммы направленности антенн, передающих сигнал, а также оценивается влияние ошибок прогнозирования параметров нисходящего канала на достоверность передачи информации. Моделирование многолучевого распространения сигнала в трехмерном физическом пространстве показывает, что прогнозируемое формирование диаграммы направленности антенн, передающих сигнал по нисходящему каналу, превосходит по характеристикам традиционное формирование диаграммы направленности в условиях рэлеевских замираний.

Ключевые слова: вероятность ошибки на бит, антенная решетка, нисходящий канал, восходящий канал, многолучевое распространение сигналов, разнесенный прием сигналов, отношение сигнал/помеха, рэлеевские замирания.

Пространственное разнесение сигналов, получаемое при применении антенной решетки, элементы которой можно рассматривать как отдельно взятые направленные антенны, т.е. антенная решетка представляется как система направленных антенн для обработки принимаемых сигналов, обеспечивает эф-

фективные меры для улучшения характеристик беспроводных систем связи [1], [2]. Если БПЛА (базовая станция) оснащен системой направленных антенн в виде антенной решетки, передаваемые сигналы взвешиваются надлежащим образом каждым элементом антенной решетки при передаче сигналов от базовой станции к

мобильным объектам. Канал связи для передачи данных от БПЛА к мобильной станции называется нисходящим каналом. Метод формирования диаграммы направленности системы антенн в виде антенной решетки, передающих сигнал по нисходящему каналу связи, позволяет усилить желаемый сигнал, получаемый мо-

бильной станцией, подавляя собственные помехи. Общая помеха в сети беспроводной системы связи включает в себя собственные помехи (SI — self-interference) и помехи, представляющие собой сигналы, спектр которых перекрывается со спектром ожидаемого сигнала (MAI — multiple-access interference). В беспроводных системах связи с множественным доступом и кодовым разделением каналов (CDMA) можно значительно уменьшить помехи типа MAI путем применения ортогональных кодов сигналов с расширенным спектром [3]. Поскольку эффект воздействия помех типа MAI преодолевается путем сжатия кода сигналов в системах CDMA, основной принцип формирования диаграммы направленности системы направленных антенн в виде антенной решетки, передающих сигналы, фокусируется на противодействии собственным помехам благодаря замираниям при многолучевом распространении сигналов. Алгоритмы формирования диаграммы направленности системы направленных антенн в виде антенной решетки на сегодняшний день были разработаны только для адаптации данных к медленно изменяющимся параметрам канала связи не учитывали рэлеевские замирания. Однако возрастающая мобильность принимающих станций приводит к быстроизменяющимся рэлеевским замираниям, т.е. параметры замираний являются случайными даже в пределах интервала наблюдения, так что принимаемый сигнал может затухать в пределах длительности одного пакета передаваемых данных. Эта проблема может быть устранена путем предлагаемого в настоящей работе адаптивного формирования диаграммы направленности системы направленных антенн в виде антенной решетки. При этом подходе весовые функции диаграммы направленности системы направленных антенн в виде антенной решетки согласовываются в соответствии с прогнозируемыми параметрами замираний.

До недавнего времени полагалось, что процесс замирания или затухания представляет собой детерминированный гармонический процесс, например,

синусоида с изменяющимися во времени параметрами, может характеризоваться, используя модель дискретного рассеивания при распространении сигналов [4]. Модифицированный исходный алгоритм классификации множественного сигнала (MUSIC) используется в [5], и алгоритм оценки параметров сигнала посредством ротационной инвариантности (ESPRIT-type algorithm — estimation of signal parameters via rotational invariance technique) используется в [6] и [7] для оценки доминантных синусоид, которые образуют замирания в нисходящем канале. Однако эти методы характеризуются сложными и интенсивными вычислениями. Линейная предсказуемость характеристик параметров канала связи с замираниями при передаче сигнала от мобильной станции (абонент или подвижный объект) к БПЛА (восходящий канал) исследуется в [8] и [9], где канал связи моделируется как стационарный в широком смысле авторегрессионный процесс (AR). При наличии системы направленных антенн в виде антенной решетки на БПЛА векторное моделирование канала и прогнозирование на основе авторегрессионной модели представлено в [10]. В настоящей работе вслед за авторегрессионным моделированием используется линейная экстраполяция с целью предсказания параметров векторной модели канала. При авторегрессионном моделировании определяемые коэффициенты используются для нахождения вектора направления передачи сигналов в предыдущие и текущие моменты времени для предсказания параметров канала связи в последующие моменты времени в беспроводных системах дуплексной связи с временным разделением каналов или применяются для обратной связи между векторами направления передачи сигналов по нисходящему каналу в прошедший и настоящий моменты времени в беспроводных дуплексных системах с частотным разделением каналов. Прогнозируемые векторы направлений передачи сигналов могут использоваться для генерирования весовых функций при формировании диаграммы направленности си-

стемы передающих антенн как в нисходящем, так и в восходящих каналах связи. С целью адаптированного формирования диаграммы направленности системы направленных антенн, передающих сигналы по нисходящему каналу, уменьшение частоты дискретизации векторов направленности распространения сигнала по отношению к частоте формирования диаграммы направленности эффективно расширяет интервал запоминания, определяемый фиксированным порядком модели авторегрессии, и уменьшает дополнительную ширину полосы частот для обратной связи в беспроводных дуплексных системах связи с частотным разделением каналов.

Прогнозирование параметров канала и формирование диаграммы направленности системы передающих антенн, обсуждаемое выше, осуществляется при наличии амплитудных или равномерных замираний в канале связи. Однако широкополосные системы беспроводной связи подвергаются частотно-избирательным замираниям, при которых разброс по времени прихода сигналов на вход приемного устройства при многолучевом распространении очень большой относительно длительности периода передачи символа. Предполагая наличие медленных замираний, т.е., параметры замирания являются детерминированными в пределах интервала наблюдения и случайными от интервала к интервалу, для беспроводной дуплексной системы связи с временным разделением каналов в [11] было предложено использовать многоканальное передающее устройство, осуществляющее разнесение сигналов посредством многолучевого распространения. Такой передатчик позволяет упростить структуру приемного устройства, сохраняя при этом рабочую характеристику многоканального приемного устройства при обработке разнесенных сигналов. В [12] сообщается о системе направленных антенн, сочетающих в себе достоинства многолучевого распространения передаваемых сигналов и пространственного разнесения передающих антенн. Передатчик широкого диапазона действий с многолучевым распространением

передаваемых сигналов приводит к [13] для беспроводных систем связи с быстро изменяющимися во времени случайным образом замираниями при многоканальном приеме разнесенных сигналов. Эти методы формирования многолучевого распространения передаваемых сигналов используют упрощенную модель многоканального приема разнесенных сигналов, в основе которой заложена линия задержек с отводами [14], и в этом случае требуется информация о состоянии канала связи в момент передачи каждого символа. Тем не менее, использование модели линии задержки, т.е. линейных фильтров с разветвленной линией задержки в приемнике и передатчике, может быть приемлемым.

В настоящей работе передача сигналов по разнесенным каналам взаимосвязана с прогнозируемым формированием диаграммы направленности системы направленных антенн, передающих широкополосные сигналы, и используется параметрическая модель для канала связи. Число параметров при таком комбинировании небольшое. Формирование диаграммы направленности системы антенн при многолучевом распространении передаваемых сигналов требует только прогнозирования векторов направления передачи сигнала по каналу связи при частоте формирования диаграммы направленности, которая намного ниже, чем частота передачи символов. Нет необходимости в интерполяции периодического опроса канала связи. Это порождает определенную нагрузку при прогнозировании параметров канала связи. Следовательно, метод псевдоинверсного формирования направления приема сигналов [15] сочетается с предварительной фильтрацией передаваемых сигналов при наличии полной информации о параметрах канала связи с целью подавления собственных помех.

Пространственно-временная модель данных

Рассмотрим K активных подвижных объектов или мобильных станций в беспроводной системе связи специфического назна-

чения. Все мобильные станции поддерживают одновременно связь с БПЛА (базовой передающей станцией), используя одинаковую несущую частоту при передаче сигнала от мобильной станции к БПЛА, и одна и та же несущая частота используется при передаче сигнала от БПЛА к каждому подвижному объекту (мобильной станции). Несущие частоты для восходящего и нисходящего каналов различаются между собой. БПЛА обладает системой направленных антенн в виде антенной решетки с M элементами. Каждая мобильная станция оснащена одной антенной с заданной диаграммой направленности. Следовательно, вектор направленности передачи сигналов между БПЛА и мобильной станцией или подвижным объектом определен в [10]. Сигнал, принимаемый БПЛА от подвижного объекта, может быть представлен в следующем виде

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{L_k} \mathbf{a}_{k,i}^{(u)}(t) \sqrt{E_k^{(u)}} s_k^{(u)}(t - \tau_{k,i}) + \mathbf{n}(t) \quad (1)$$

где индекс (u) обозначает восходящий канал, L_k — общее число допустимых каналов распространения сигнала от k -ой мобильной станции к БПЛА; $\mathbf{a}_{k,i}^{(u)}(t)$ — изменяющийся во времени вектор направления передачи сигнала по i -му каналу многолучевого распространения сигнала от k -ой мобильной станции к БПЛА; $\tau_{k,i}$ — задержка во времени при передаче сигнала по i -му каналу от k -ой мобильной станции к БПЛА; $E_k^{(u)}$ — энергия сигнала, переданного от k -ой мобильной станции к БПЛА, определяемая мощностью передатчика мобильной станции; $\mathbf{n}(t)$ — вектор собственных шумов приемника БПЛА, каждый элемент которого является аддитивным белым гауссовским шумом с односторонней спектральной плотностью мощности $\mathcal{N}_0$; $s_k^{(u)}(t - \tau_{k,i})$ — сигнал, переданный от k -ой мобильной станции к БПЛА.

Полагаем, что БПЛА обладает многоканальным приемным устройством, причем все каналы приемного устройства синхронизированы с каждым каналом при многолучевом распространении сигналов. При многолучевом распространении сигналов существуют каналы с различным направлением приема сигналов, т.е., угол приема сигнала относительно центральной оси диаграммы направленности (DOA). Предполагаем, что есть L_s направлений распространения сигналов, которые вносят значительный вклад в i -й канал многолучевого распространения передаваемого сигнала и которым нельзя пренебречь. Тогда вектор направления передачи сигнала между мобильной станцией и БПЛА (передача сигнала по восходящему каналу связи) может быть представлена в виде

$$\mathbf{a}_{k,i}(t) = \sum_{j=1}^{L_s} \alpha_{k,i,j}(t) \mathbf{v}(\theta_{k,i,j}) \quad (2)$$

где $\mathbf{v}(\theta_{k,i,j})$ — отклик системы направленных антенн в виде антенной решетки, обусловленный направлением приема сигналов $\theta_{k,i,j}$; $\alpha_{k,i,j}(t)$ — комплексная амплитуда сигнала, которая может быть, опуская индексы k и i , представлена в следующем виде:

$$\alpha_j(t) = \rho_j \exp\{j2\pi[f_c t - (f_c + f_j)\tau_j]\} \quad (3)$$

где f_c — несущая частота; ρ_j — комплексный коэффициент усиления j -ой компоненты канала многолучевого распространения передаваемого сигнала; τ_j — задержка во времени, обусловленная распространением сигнала по j -ой компоненте канала многолучевого распространения передаваемого сигнала. Доплеровская частота f_j обусловлена движением мобильной станции и определяется как

$$f_j = f_c (v/c) \cos \psi_j \quad (4)$$

где $\mathbf{v}$ — относительная скорость движения мобильной станции; c — скорость распространения электромагнитной волны (скорость света); ψ_j — угол между направлением распространения (передачи) сигнала от мобильной станции к БПЛА по j -ой компоненте канала многолучевого распространения передаваемого сигнала и направлением движения мобильной станции. Предполагается, что параметры канала связи θ_j , ρ_j и τ_j должны быть фиксированными в пределах короткого периода

времени передачи нескольких сотен символов, а рэлеевские замирания вносят основной вклад в искажение параметров передаваемого сигнала по сравнению с потерями при распространении сигнала по каналу связи или эффектами экранирования различными объектами. Рэлеевские замирания являются результатом разрушительного сочетания составляющих канала связи при многолучевом распространении передаваемого сигнала, обусловленных ненулевыми доплеровскими частотами, присутствующими во множестве комплексных амплитуд $\{\alpha_i(t)\}$. Предполагается, что все доплеровские частоты $\{f_j\}$ остаются неизменными в течение всего времени наблюдения. Передаваемый сигнал $s_k(t)$ зависит от информационного битового потока $b_k(n)$ и модулирующего сигнала $g_k(t)$

$$s_k(t) = \sum_n b_k(n) g_k(t - nT_s) \quad (5)$$

где T_s — период передачи символов. Модулирующий сигнал $g_k(t)$ представляет собой конволюцию или свертку импульсного сигнала на выходе фильтра или импульсной характеристики фильтра и ортогонального расширения спектра в системах беспроводной связи с множеством мобильных станций и кодовым разделением сигналов, которая может быть представлена кодовой последовательностью псевдослучайной длины [3]. Предполагается, что изменения вектора направлений распространения сигнала по каналу связи $\mathbf{a}_{k,i}(t)$ в пределах периода передачи символов T_s незначительны.

Предполагаем, что приемник сигналов, разработанный на основе обобщенной методологии обработки сигналов на фоне помех [16]-[19] и представляющий собой композиционное сочетание оптимальных в смысле критерия Неймана-Пирсона приемных устройств, когда параметры и форма ожидаемого сигнала априори известны (корреляционный приемник) и априори неизвестны (энергетический или автокорреляционный приемник), с идеальной синхронизацией присутствует в каждом канале многоканального приемного устройства для приема разнесенных сигналов. Тогда дискретный сигнал на выходе i -го канала имеет вид:

$$\mathbf{y}_{k,i}(n) = \int_{(n-1)T_s + \tau_{k,i}}^{nT_s + \tau_{k,i}} g_k(t - nT_s - \tau_{k,i}) \mathbf{x}(t) dt = \sqrt{GE_k} \mathbf{a}_{k,i}(n) b_k(n) + \tilde{\mathbf{n}}_i(n) \quad (6)$$

где G — коэффициент расширения спектра сигнала, т.е. произведение длительности импульса на ширину занимаемой полосы частот; $\tilde{\mathbf{n}}_i(n)$ — вектор, описывающий совокупность собственных помех, символьных помех и гауссовский шум. При условии, что векторы направлений распространения сигнала к приемному устройству известны, выходы обобщенного многоканального приемника [19] могут быть когерентно суммируемые, используя суммирование дифференциально взвешенных сигналов каждого канала, следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_k(n) &= \sum_{i=1}^{L_k} \{2\mathbf{a}_{k,i}^H(n) \mathbf{y}_{k,i}(n) - \mathbf{y}_{k,i}^2(n) + \mathbf{n}_i^2(n)\} \\ &= \sqrt{GE_k} b_k(n) \sum_{i=1}^{L_k} \{\|\mathbf{a}_{k,i}(n)\|^2 - 2[\mathbf{a}_{k,i}^H(n) - \mathbf{a}_{k,i}(n)] \xi_i(n) + \mathbf{n}_i^2(n)\} \end{aligned} \quad (7)$$

где символ H означает сопряженное транспонирование (преобразование);

$$\sum_{i=1}^{L_k} \xi_i(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} h_{PF}(m) \tilde{\mathbf{n}}_i(n - m) \quad (8)$$

помеха, образующаяся на выходе линейной системы обобщенного приемного устройства, например, предварительного полосового фильтра PF с импульсной характеристикой $h_{PF}(m)$, присутствующей на входе обобщенного приемника [19];

$$\sum_{i=1}^{L_k} \mathbf{n}_i(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} h_{AF}(m) \tilde{\mathbf{n}}_i(n - m) \quad (9)$$

помеха, образующаяся на выходе линейной системы, например, дополнительного полосового фильтра AF с импульсной характеристикой $h_{AF}(m)$, присутствующей на входе обобщенного приемника [19].

Для простоты анализа предполагается, что эти фильтры обладают одинаковыми амплитудно-частотными характеристиками или импульсными откликами одинаковой формы. Кроме того, AF настроен по центральной частоте относительно PF на такую величину, что информационный сигнал, переданный от мобильной станции к БПЛА или наоборот, не может проходить через AF из-за несовпадения полосы пропускания фильтра и ширины спектра частот сигнала. Таким образом, информационный сигнал и помеха могут наблюдаться на выходе PF, и только помеха может наблюдаться на выходе AF. Если величина несовпадения по центральной частоте между PF и AF более чем $4 \div 5 \Delta f_s$, где Δf_s — ширина полосы частот сигнала, процессы, формирующиеся на выходах PF и AF, могут рассматриваться как некоррелированные и независимые процессы. На практике, при выполнении этого условия, коэффициент корреляции между процессами, наблюдаемыми на выходах PF и AF, не превосходит по величине 0.05, что было подтверждено экспериментально в [20] и [21].

Необходимо отметить, что в общем случае, часть полосы пропускания AF может быть занята сигналами, передаваемыми другими мобильными станциями или другими источниками электромагнитного излучения, невходящими в состав рассматриваемой системы беспроводной связи. В этом случае, такие сигналы могут рассматриваться как дополнительные помехи. Случай нахождения спектра частот дополнительной помехи в пределах полосы пропускания AF, воздействие этого эффекта на рабочие характеристики обобщенного приемника, а также неидеальные условия функционирования обобщенного приемника, когда помехи на вы-

ходах RF и AF не являются идентичными по статистическим параметрам, и RF и AF имеют разные полосы пропускания частот, рассматриваются в [22]. Детальный анализ RF и AF представлен в [17, Глава 3] и [18, Глава 5].

Как следует из (7), при идеальных условиях функционирования обобщенного приемника, которые на практике не встречаются, т.е. при условии равенства модели ожидаемого сигнала $\mathbf{a}_{k,i}^H(n)$, генерируемой в месте приема, и переданным информационным сигналом $\mathbf{a}_{k,i}(n)$, другими словами, коэффициент корреляции между ними равен единице, второй член под знаком суммирования в (7) обращается в нуль, что говорит о полной компенсации в статистическом смысле помеховой составляющей

$$\sum_{i=1}^{L_k} \mathbf{a}_{k,i}^H(n) \xi_i(n),$$

обусловленной взаимодействием между моделью сигнала и помехой, формирующейся на выходе RF, и случайной составляющей, обусловленной взаимодействием между информационным сигналом и помехой, формирующейся на выходе RF, $\sum_{i=1}^{L_k} \mathbf{a}_{k,i}(n) \xi_i(n)$. Третий член под знаком суммирования в (7) представляет собой разность мощностей между помехами, образующимися на выходах RF и AF, соответственно, которая при идеальных условиях стремится к нулю в статистическом смысле.

Предполагаем, что в рассматриваемом случае беспроводной системы связи все виды рассматриваемых помех, т.е. собственные помехи, межсимвольные помехи и гауссовский шум, независимы между собой, а также помехи, порождаемые отдельными элементами системы направленных антенн в виде антенной решетки, некоррелированы между собой. При этих предположениях, а также учитывая, что обобщенная помеха $\tilde{\mathbf{n}}(n)$ является пространственно-временным белым шумом, суммирование дифференциально взвешенных сигналов каждого канала приводит к максимальным значениям отношения сигнал/помеха (SNR) на выходе обобщенного приемного устройства [23].

Прогнозирование параметров нисходящего канала

Рассмотрим асимметрию между восходящим каналом (передача информации от мобильной станции к БПЛА) и нисходящим каналом (передача информации от БПЛА к мобильной станции). Временная задержка при распространении сигнала по нисходящему каналу не отличается по величине от временной задержки при передаче сигнала по восходящему каналу. Тем не менее, для беспроводных дуплексных систем связи с временным разделением каналов вектор сигнала $\mathbf{a}_{k,i}^{(d)}(t)$, передаваемого по нисходящему каналу связи, кардинально отличается от вектора сигнала $\mathbf{a}_{k,i}^{(u)}(t)$, передаваемого по восходящему каналу связи в пределах периода передачи информации дуплексной системой связи с временным разделением каналов при изменении параметров рэлеевских замираний случайным образом в пределах периода передачи информационного сигнала (быстрые флуктуации рэлеевских замираний). Вследствие этого появляется очень сильное ухудшение по величине параметров передаваемого сигнала, например, замирание по амплитуде или по другим параметрам в пределах периода передачи информационных символов. В беспроводных дуплексных системах связи с частотным разделением каналов в дополнение к случайным изменениям параметров сигнального вектора в пределах периода передачи символов в нисходящем и восходящем каналах связи присутствуют независимые замирания [24]. Следовательно, необходимо, чтобы БПЛА осуществляла прогнозирование параметров нисходящего канала для последующих временных интервалов для адаптивной передачи информационных данных при наличии быстрых флуктуаций параметров рэлеевских замираний.

Дуплексные системы связи с временным разделением каналов

В беспроводных дуплексных системах связи с временным разделением каналов при использовании одной и той же частоты несущего колебания нисходящий и восходящий радиоканалы являются взаимными. Вектор сигналов $\mathbf{a}_{k,i}^{(u)}(t)$, передаваемых по восходящему каналу, извлекается из сигнала, принимаемого приемным устройством БПЛА, и может быть использован для дальнейшего предсказания параметров нисходящего канала. Здесь и далее мы опускаем индексы k и i , подразумевая, что мы рассматриваем i -й канал для k -ой мобильной станции. Предполагая высокую вероятность обнаружения для бита символов $b(n)$, приемное устройство БПЛА может определять вектор направления передаваемых сигналов по восходящему каналу при заданной скорости передачи символов, используя следующие соотношения

$$b^*(n) \mathbf{y}(n) = \sqrt{GE_k} \mathbf{a}(n) + \mathbf{u}(n) \quad (10)$$

$$\mathbf{u}(n) = b(n) \tilde{\mathbf{n}}(n) \quad (11)$$

представляет собой сумму взаимной помехи и обобщенной помехи (совокупность собственных помех, межсимвольных помех и гауссовского шума). В настоящей работе предполагается, что K мобильных станций передают по восходящему каналу сигналы одинаковой и постоянной мощности. Следовательно, оценка $\hat{\mathbf{a}}(n)$ сигнального вектора $\mathbf{a}(n)$ может быть определена из (10), нормируя коэффициент ослабления сигнала. Если в системах беспроводной связи с множественным доступом и кодовым разделением каналов мобильные станции передают сигналы с разными мощностями с целью компенсации затруднений в радиосвязи между БПЛА и подвижными объектами, находящимися на значительном удаленных расстояниях от БПЛА, оценка сигнального вектора может быть нормализована к $\sqrt{E_k} \mathbf{a}(n)$, что не будет воздействовать на формирование направленности передачи сигнала. Согласно (2) и (3), вектор направленности передачи сигнала может быть представлен как

$$\mathbf{a}(n) = \sum_{j=1}^{L_k} \mathbf{v}(\theta_j) \rho_j \exp\{-j2\pi(f_c + f_j)\tau_j\} \exp\{j2\pi f_j n T_s\} \quad (12)$$

Видно, что оценка сигнального вектора $\mathbf{a}(n)$ представляет собой гармоническое колебание, которое состоит из суперпозиции показательных функций на фоне помехи. В результате, наличие резких пиков является главной характерной особенностью спектра мощности оценок параметров канала связи. Это служит достаточным обоснованием для использования идеальной модели канала связи (модели с одними полюсами). В дальнейшем, как показано в (12), сигналы, получаемые каждой из M антенн БПЛА и комбинированные с различными фазами, обладают одинаковыми доплеровскими сдвигами по частоте. Следовательно, коэффициенты всеполюсных моделей одинаковые для оценок параметров канала для каждой антенны системы направленных антенн. Предполагая стационарность в широком смысле, мы моделируем оценку сигнального вектора, используя гауссовский авторегрессионный процесс p -го порядка, следующим образом

$$\hat{\mathbf{a}}(n) = -\sum_{l=1}^p q'_l \hat{\mathbf{a}}(n-l) + \mathbf{e}(n) \quad (13)$$

где $\{q'_l\}, l=1, \dots, p$ — коэффициенты регрессионной модели; $\mathbf{e}(n)$ — пространственный белый гауссовский шум. Положения резких пиков в спектре соответствует полюсам, расположенным около окружности с единичным радиусом

$$z'_j = \exp\{j2\pi f_j T_s\} \quad (14)$$

которые определяются доплеровскими частотами в p доминантных каналах. Мы используем q' и z' для различия между коэффициентами авторегрессии и полюсами модели канала, описанными ниже по тексту.

С целью формирования диаграммы направленности передающей антенны БПЛА при передаче сигналов к подвижным объектам необходимо прогнозировать вектор направления передачи сигналов по нисходящему каналу связи в моменты времени, когда устанавливается весовая функции формирования направления передачи сигналов. Поскольку скорость установления весовой

функции формирования направления передачи сигнала намного меньше скорости передачи символов, в восходящем канале может выбираться каждая десятая выборка для образования интервала наблюдения с целью прогнозирования процесса передачи сигналов по нисходящему каналу. Следовательно, время на запоминание для прогнозирования может быть намного больше заданного порядка модели. Прореживатель последовательности импульсов состоит из устройства, понижающего разрешение, т.е. понижающего дискретизацию, с предшествующим фильтром нижних частот, который функционирует как фильтр для устранения эффекта наложения спектров при дискретизации. Мы ограничиваем выборки передаваемых символов по восходящему каналу полосой частот, которая включает в себя ожидаемые доплеровские частоты, и затем понижаем разрешение или частоту дискретизации результирующих данных (полученных данных) к частоте формирования диаграммы направленности передающей антенны БПЛА. Частота формирования диаграммы направленности обычно больше в два раза максимального значения доплеровской частоты. Версия гауссовского авторегрессионного процесса порядка p $AR(p)$ с пониженной частотой дискретизации может быть представлена в виде:

$$\hat{\mathbf{a}}(n) = -\sum_{i=1}^p q_i \hat{\mathbf{a}}(n - lL_b) + \mathbf{e}(n) \quad (15)$$

где L_b — период формирования направленной передачи символа, в пределах которого данные будут передаваться, используя фиксированные весовые функции. Частота формирования диаграммы направленности передающей антенны определяется как

$$f_B = 1/(L_b T_s) \quad (16)$$

Коэффициенты авторегрессии

$$\mathbf{q}_p = [1, q_1, \dots, q_p]^T \quad (17)$$

могут вычисляться как решение линейных уравнений для метода наименьших квадратов [25]

$$\mathbf{A} \mathbf{q}_p = 0 \quad (18)$$

где матрица $\mathbf{A}$ определяется как

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{a}}(N) & \hat{\mathbf{a}}(N-L_b) & \dots & \hat{\mathbf{a}}(N-pL_b) \\ \hat{\mathbf{a}}(N-1) & \hat{\mathbf{a}}(N-1-L_b) & \dots & \hat{\mathbf{a}}(N-1-pL_b) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \hat{\mathbf{a}}(1+pL_b) & \hat{\mathbf{a}}(1+(p-1)L_b) & \dots & \hat{\mathbf{a}}(1) \\ \hat{\mathbf{a}}^*(1) & \hat{\mathbf{a}}^*(1+L_b) & \dots & \hat{\mathbf{a}}^*(1+pL_b) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \hat{\mathbf{a}}^*(N-pL_b) & \hat{\mathbf{a}}^*[N-(p-1)L_b] & \dots & \hat{\mathbf{a}}^*(N) \end{bmatrix} \quad (19)$$

символ $*$ — означает комплексное сопряжение; $\{\hat{\mathbf{a}}(1), \hat{\mathbf{a}}(1), \dots, \hat{\mathbf{a}}(N)\}$ оценки сигнальных векторов восходящего канала на выходе фильтра нижних частот, где N ограничивается общим числом символов в пределах одного периода передачи данных по восходящему каналу. Как следует из структуры матрицы $\mathbf{A}$, $1+p$ сигнальные векторы канала передачи данных от БПЛА к подвижному объекту при наличии провала диаграммы направленности передающей антенны, т.е. отсутствии сигнала, в пределах периода передачи символа L_b между двумя соседними периодами выбираются для формирования M линейных уравнений. Существует $N - pL_b$ групп таких $1+p$ сигнальных векторов канала передачи данных от БПЛА к подвижному объекту поскольку первый вектор каждой группы может быть выбран в пределах от $\hat{\mathbf{a}}(1)$ до $\hat{\mathbf{a}}(N - pL_b)$. Используется

прямое и обратное линейное прогнозирование для того, чтобы гарантировать теплицеву форму или структуру нормализованным уравнениям в сочетании с авторегрессионной моделью [25]. При условии, что коэффициенты авторегрессионной модели заданы, сигнальные векторы нисходящего канала могут быть получены, исходя из текущих данных, передаваемых по восходящему каналу посредством многоотводной линии задержки по времени, которая создает одношаговое линейное прогнозирование, используя фильтр с конечной импульсной переходной характеристикой, т.е.

$$\tilde{\mathbf{a}}(n) = -\sum_{i=1}^p q_i \hat{\mathbf{a}}(n - iL_b) \quad (20)$$

Полагаем, что $\hat{\mathbf{a}}(N)$ есть последний оцениваемый сигнальный вектор в пакете данных, переданных по восходящему каналу. Множество сигнальных векторов $\hat{\mathbf{a}}(n)$, переданных по нисходящему каналу при $n = N + L_b, N + 2L_b, \dots$ должны быть предсказаны для формирования диаграммы направленности передающей антенны. Одношаговый предсказатель выделяет $\hat{\mathbf{a}}(N + L_b)$ из наблюдаемых данных, передаваемых по восходящему каналу. Тем не менее, для множества $\tilde{\mathbf{a}}(n)$ при $n = N + 2L_b, N + 3L_b, \dots$, необходимо использовать предсказанные ранее значения для фильтра с конечной импульсной переходной характеристикой. Это вызывает распространение ошибок при дальнейшем прогнозировании параметров нисходящего канала. Этот эффект будет обсуждаться при анализе результатов моделирования.

Дуплексные системы с частотным разделением каналов

Для линейного прогнозирования необходима информация о коэффициентах авторегрессии и знание предыдущих и текущих векторов направления распространения сигнала. В дуплексных системах связи с частотным разделением каналов восходящий (от мобильной станции к БПЛА) и нисходящий (от БПЛА к мобильной станции) каналы некоррелированы между собой в момент передачи информационных данных, а рассогласованность по несущей частоте больше, чем ширина полосы частот одновременно замиряющих сигналов. Следовательно, векторы направления передачи сигнала по восходящему каналу $\mathbf{a}^{(u)}(t)$ не могут быть экстраполированы для аппроксимации ожидаемых векторов направления передачи сигнала $\mathbf{a}^{(d)}(t)$ по нисходящему каналу. Тем не менее, коэффициенты прогнозирования модели нисходящего канала могут быть получены, модифицируя коэффициенты авторегрессии модели восходящего канала. Гауссовский авторегрессионный процесс порядка p $AR(p)$, представленный в (15), может быть выражен в следующей форме:

$$[\hat{\mathbf{a}}^{(u)}(n)\hat{\mathbf{a}}^{(u)}(n - L_b) \dots \hat{\mathbf{a}}^{(u)}(n - pL_b)]\mathbf{q}_p^{(u)} = \mathbf{e}(n) \quad (21)$$

Таким образом, оценки векторов направления передачи сигнала $\hat{\mathbf{a}}^{(u)}(n)$ могут моделироваться в виде процесса на выходе линейного полюсного фильтра при наличии на входе белого шума $\mathbf{e}(n)$. Передаточная функция такого линейного фильтра определяется как

$$H(z) = \frac{1}{A(z)} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^p q_i^{(u)} z^{-i}} \quad (22)$$

Коэффициенты авторегрессии $\{q_i^{(u)}\}, i = 1, \dots, p$ и полюса канала связи $\{z_i^{(u)}\}, i = 1, \dots, p$ связаны непосредственно между собой, поскольку $\{q_i^{(u)}\}$ и $\{z_i^{(u)}\}$ являются полиномиальными параметрами и корнями $A(z)$, соответственно. Полюса канала задаются в соответствующем виде:

$$z_i^{(u)} = \exp\{j2\pi f_i^{(u)} L_b T_s\} = \exp\left\{\frac{j2\pi f_i^{(u)}}{f_B}\right\} \quad (23)$$

Напомним, что доплеровская частота, заданная в (4), определяется относительной скоростью v и углом ψ_i для мобильной станции, которые являются одинаковыми как для нисходящего, так и для восходящего каналов, в то время как несущие частоты, как для восходящего $f_c^{(u)}$, так и нисходящего $f_c^{(d)}$ каналов отличаются в дуплексных системах с частотным разделением каналов. Итак, доплеровские частоты отличаются в восходящем и нисходящем каналах. Следовательно, существует отличие между полюсами восходящего и нисходящего каналов. Каналы с быстрыми замиряниями, встречающиеся на практике, представляют доплеровские частоты в пределах 100-200 Гц [26]. Обычно частота формирования направленного сигнала $f_B \gg f_i$. Например, равномерное изменение весовых функций в 8 раз при формировании направленного сигнала в пределах длительности передачи данных, равной 2,5 миллисекундам, приводит к частоте формирования направленного сигнала, равной 3,2 КГц. Следовательно, при небольших изменениях доплеровской частоты нет фазовой неопределенности полюсов канала на плоскости комплексной переменной в пределах 2π . Обозначим фазу комплексной величины как $\Phi(0)$:

$$\Phi(z_i) = 2\pi f_i / f_B \quad (24)$$

Полюса восходящего канала могут быть преобразованы к полюсам нисходящего канала, модифицируя фазовые компоненты следующим образом

$$\Phi(z_i^{(d)}) = \Phi(z_i^{(u)}) f_c^{(d)} / f_c^{(u)} \quad (25)$$

Необходимо отметить, что коэффициенты авторегрессии нисходящего канала $q_p^{(d)}$ формируются на основании полюсов нисходящего канала $\{z_i^{(d)}\}, i = 1, \dots, p$. На практике при использовании беспроводных дуплексных систем связи с частотным разделением каналов частота несущего колебания гораздо выше по сравнению с рассогласованностью по частоте между несущими частотами нисходящего и восходящего каналов. Для частоты несущей по-

рядка нескольких ГГц и разброса по частоте несущей порядка десятка или сотен МГц, отношение частот $f_c^{(d)} / f_c^{(u)} \cong 1$. Следовательно, предполагая, что каждый восьмой элемент системы направленных антенн БПЛА имеет идентичную диаграмму направленности передачи сигнала на частотах восходящего и нисходящего канала, коэффициенты авторегрессии модели восходящего канала могут непосредственно использоваться для прогнозирования параметров нисходящего канала без какой-либо модификации.

Как упоминалось ранее, один из моментов, усложняющих прогнозирование параметров канала в дуплексных системах связи с частотным разделением каналов, является необходимость непосредственного измерения параметров нисходящего канала, используя оборудование БПЛА. Зондирующий сигнал обратной связи, генерируемый мобильной станцией, может быть использован для обеспечения векторов направления передачи сигнала по нисходящему каналу [27]. Сигнал обратной связи нисходящего канала обладает временной задержкой в момент передачи данных от БПЛА, что служит достаточным обоснованием необходимости прогнозирования параметров канала. Поскольку предварительное многолучевое распространение передаваемого сигнала применяется в сочетании с компенсацией замираний в каждом канале, мобильная станция может только извлекать единственный канал с компенсацией замираний, который является совокупностью нескольких индивидуальных маршрутов сигнала с весовой функцией. Следовательно, зондирующий сигнал или сигнал управления всенаправленного формирования диаграммы направленности с весовыми функциями передающей антенны должен передаваться по нисходящему каналу, предполагая, что мобильные станции могут синхронизировать периодичность получения управляющего сигнала. Частота посылки управляющего сигнала и частота зондирующего сигнала обратной связи могут быть низкими также, как и частота формирования диаграм-

мы направленности передающей антенны, так как требуется только знание вектора направленности передачи сигнала для линейного прогнозирования. Много исследований было выполнено по оценке параметров канала связи, используя сигнал управления [28], и принципов модуляции [29], а также по исследованию сигналов обратной связи [30], [31]. Исследование воздействия сигнала управления и обратной связи при определении параметров нисходящего сигнала выходит за рамки настоящей статьи. При проведении моделирования и обсуждении результатов, мы полагаем, что отсутствуют ошибки при оценивании параметров канала связи с мобильной станцией, и нет искажений параметров сигнала обратной связи.

Выбор порядка модели

Если множество оценок векторов направленности передачи сигналов $\{\hat{\mathbf{a}}(1), \hat{\mathbf{a}}(2), \dots, \hat{\mathbf{a}}(N)\}$ определяется с целью формирования матрицы $\mathbf{A}$, заданной в (18), порядок модели p ограничивается

$$p \leq (N - 1) / L_b \quad (26)$$

Полагаем, что в (21) вектор $\mathbf{e}(n)$ представляет собой белый шум, компоненты которого независимы между собой и распределены в соответствии с комплексным многопараметрическим (многомерным) гауссовским распределением с нулевым математическим ожиданием и ковариационной матрицей

$$\mathbf{C}_e = \sigma_e^2 \mathbf{I} \quad (27)$$

Порядок модели p выбирается, следовательно, в диапазоне

$$0 < p < (N - 1) / L_b \quad (28)$$

с целью минимизации общей квадратичной ошибки прогнозирования

$$p^* = \arg \min_{\substack{0 \leq p \leq (N-1)/L_b \\ q_1, \dots, q_p}} \sum_{n=pL_b+1}^N \|\mathbf{e}(n)\| \quad (29)$$

Пусть $q_1, \dots, q_p$ и σ_e^2 являются параметрами вектора $\Theta^{(p)}$ гауссовского авторегрессионного процесса порядка p $AR(p)$. Относительно ошибок прогнозирования, представленных в виде независимых векторов пространственного белого шума с нулевым математическим ожиданием, совместная плотность распределения вероятностей может быть представлена как

$$f[\mathbf{e}(pL_b + 1), \dots, \mathbf{e}(N); \Theta^{(p)}] = \prod_{i=pL_b+1}^N \frac{1}{(\pi\sigma_e^2)^M} \exp\{-1/\sigma_e^2 \mathbf{e}^H(i)\mathbf{e}(i)\} \quad (30)$$

где M — размерность вектора, т.е. количество передающих антенн БПЛА. Оптимальный порядок модели p^* может быть определен путем выбора модели, которая минимизирует стандартный информационный критерий Akaike (AIC) [32] или критерий минимальной длины описания (MDL) [33]. После некоторых преобразований эти критерии могут быть определены как

$$AIC(p) = 2M(N - pL_b) \{\ln[\pi(r_{00} - \mathbf{r}_0^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r}_0)] + 1\} + 2(2p + 1) \quad (31)$$

$$MDL(p) = M(N - pL_b) \{\ln[\pi(r_{00} - \mathbf{r}_0^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r}_0)] + 1\} + \frac{2p+1}{2} \ln(N - pL_b) \quad (32)$$

где

$$\mathbf{r}_0 = [r_{10}, \dots, r_{p0}]^T \quad (33)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1p} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{p1} & r_{p2} & \dots & r_{pp} \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$r_{ki} = [M(N - pL_b)] \sum_{i=pL_b+1}^N \hat{\mathbf{a}}^H(i - kL_b) \hat{\mathbf{a}}(i - iL_b) \quad (35)$$

Показатели характеристик прогнозирования

Полагаем, что каждая мобильная станция передает сигналы единичной мощности, т.е. $p_k = 1, k = 1, 2, \dots, K$. Пусть $\mathbf{a}^{(d)}$ и $\tilde{\mathbf{a}}^{(d)}$ обозначают истинный вектор направления передачи сигнала и предсказываемый вектор направлении передачи сигнала по нисходящему каналу, соответственно. Нормализованная среднеквадратическая ошибка предсказания параметров канала имеет вид:

$$RMSE(n) = \sqrt{\frac{E[\|\tilde{\mathbf{a}}^{(d)}(n) - \mathbf{a}^{(d)}(n)\|^2]}{E[\|\mathbf{a}^{(d)}(n)\|^2]}} \quad (36)$$

Мы используем этот показатель для определения качества прогнозирования параметров канала.

Изменение во времени вектора направления передачи сигнала может быть определено с помощью измерений относительного изменения амплитуды в зависимости от изменения угла, как это было определено в [10]. Относительное изменение амплитуды вектора направления передачи сигнала, как правило, очень мало, т. к. маловероятно, что параметры всех составляющих вектора направления передачи сигнала ухудшаются одновременно. Однако относительное изменение угла вектора направления передачи сигнала может изменяться в пределах от "0" до "1" в течение длительности передачи пакета данных при наличии быстрых флюктуаций рэлеевских замираний. При этом логический нуль "0" указывает на параллельность истинного и прогнозируемого векторов направления передачи сигнала, а логическая единица "1" отмечает ортогональность этих векторов [10]. В этом случае, при формировании диаграммы направленности передающей антенны, осуществляемого на основе прогнозирования параметров вектора направления передачи сигнала, мы вводим относительную амплитуду с относительным углом между истинным и прогнозируемым вектором направления передачи сигнала и определяем ошибку прогнозирования как отношение

$$\gamma(n) = \frac{\|\mathbf{P}_{\tilde{\mathbf{a}}^{(d)}(n)} \mathbf{a}^{(d)}(n)\|}{\|\tilde{\mathbf{a}}^{(d)}(n)\|} = \frac{\tilde{\mathbf{a}}^{(d)H}(n) \mathbf{a}^{(d)}(n)}{\|\tilde{\mathbf{a}}^{(d)}(n)\|^2} \quad (37)$$

где $\mathbf{P}_{\tilde{\mathbf{a}}^{(d)}(n)}$ обозначает ортогональную проекцию на вектор $\tilde{\mathbf{a}}^{(d)}(n)$. Как показано ниже, в случае одноканального распространения луча при компенсации замираний, мощность сигнала, принимаемого мобильной станцией, пропорциональна $\gamma^2(n)$. Мы используем этот параметр для оценки воздействия ошибок прогнозирования на формирование диаграммы направленности антенны для передачи информации по нисходящему каналу.

Прогнозирование формирования диаграммы направленности

Предсказываемые векторы направления передачи сигнала по нисходящему каналу $\{\tilde{\mathbf{a}}_{k,i}^{(d)}(n)\}, n = N + L_b, N + 2L_b, \dots$ могут быть использова-

ны для генерирования весовых функций передающих антенн БПЛА, что усиливает мощность сигнала, принимаемого мобильной станцией. Диаграмма направленности передающей антенны БПЛА изменяется в моменты отсчета $n = N + L_b, N + 2L_b, \dots$ в пределах длительности одного пакета передаваемых данных так, что прием сигналов мобильной станцией является устойчивым по отношению к изменениям параметров нисходящего канала связи при быстрых рэлеевских замираниях. В широкополосных системах связи предсказываемые векторы направлений передачи сигналов по нисходящему каналу $\{\tilde{\mathbf{a}}_{k,i}^{(d)}(n)\}$ по всем направлениям распространения сигнала включены в диаграмму направленности передающей антенны БПЛА для осуществления суммирования дифференциально взвешенных сигналов каждого канала приемным устройством мобильной станции.

Многочуевое распространение сигналов.

Многоканальное приемное устройство разнесенных сигналов используется в широкополосных системах беспроводной связи для получения коэффициента усиления при разнесенном приеме сигналов и, как правило, эти системы применяются как БПЛА, так и мобильной станцией. Для сохранения простоты процедуры приема и обработки сигналов мобильной станцией, БПЛА использует передачу сигналов с предварительным многочуевым распространением, т.е. многоканальную передачу сигналов. Сочетание многоканальной связи имеет эффект при передаче сигналов передающей антенной БПЛА. Каждая мобильная станция требует только один канал приема. При передаче весового вектора $\mathbf{W}_{k,i}$ диаграммы направленности, выделенного для i -го канала и k -ой мобильной станции, БПЛА передает сигнал, который состоит из данных для пользователя с опережением во времени, соответствующим временным задержкам в нисходящем канале, в виде:

$$\mathbf{s}^{(d)}(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{L_k} \mathbf{w}_{k,i}^H \mathbf{s}_k^{(d)}(t + \tau_{k,i}) \exp\{j2\pi f_{k,i} \tau_{k,i}\} \quad (38)$$

где $\mathbf{s}_k^{(d)}(t)$ — информационный сигнал, принимаемый k -ой мобильной станцией; $\tau_{k,i}$ — задержка по времени прихода сигнала по i -му каналу на вход приемного устройства k -ой мобильной станции. Поскольку $\exp\{j2\pi f_{k,i} \tau_{k,i}\} \cong 1$, синфазный член в (38) можно рассматривать как очень малую величину для доплеровских частот или задержек по времени при многочуевом распространении сигналов. Другая фазовая компонента $\exp\{j2\pi f_{k,i} \tau_{k,i}\}$ при передаче радиосигналов на несущей частоте $f_{k,i}$ содержится в прогнозируемом векторе направления передачи сигнала $\{\tilde{\mathbf{a}}_{k,i}^{(d)}(n)\}$. Поскольку множество весовых векторов $\{\mathbf{w}_{k,i}\}$ генерируется в соответствии множеством векторов $\{\tilde{\mathbf{a}}_{k,i}^{(d)}(n)\}$, то множество векторов $\{\mathbf{w}_{k,i}^H\}$ полностью синфазное. Следовательно, сигнал на входе приемного устройства k -ой мобильной станции имеет вид

$$\begin{aligned} x_k(t) &= \sum_{i=1}^{L_k} \mathbf{s}^{(d)}(t - \tau_{k,i}) \mathbf{a}_{k,i}^{(d)}(t) + n_k(t) \\ &= \underbrace{\sum_{i=1}^{L_k} \mathbf{w}_{k,i}^H \mathbf{a}_{k,i}^{(d)}(t) \mathbf{s}_k^{(d)}(t)}_{\mathcal{W}_k} + \underbrace{\sum_{i \neq j}^K \mathbf{w}_{k,j}^H \mathbf{a}_{k,i}^{(d)}(t) \mathbf{s}_k^{(d)}(t + \tau_{k,j} - \tau_{k,i})}_{\mathcal{A}_k} \\ &\quad + \underbrace{\sum_{i \neq j}^K \sum_{i,j} \mathbf{w}_{k,j}^H \mathbf{a}_{k,i}^{(d)}(t) \mathbf{s}_k^{(d)}(t + \tau_{k,j} - \tau_{k,i})}_{\mathcal{A}_k} + n_k(t) \end{aligned} \quad (39)$$

где $\mathcal{W}_k$ — информационный сигнал; $\mathcal{A}_k$ — собственные или взаимные помехи; $\mathcal{A}_k$ — помехи, спектр которых перекрывается со спектром ожидаемого информационного сигнала, соответственно; $n_k(t)$ — аддитивный белый гауссовский шум с односторонней спектральной плотностью мощности $\mathcal{N}_0$.

В системах множественного доступа с кодовым разделением каналов помехи $\mathcal{A}_k$ могут быть скомпенсированы в статистическом смысле при использовании приемного устройства мобильной станции, сконструированного на основе обобщенной методологии обработки сигналов на фоне помех [16]-[18]. Однако собственные или взаимные помехи могут проявляться в виде разбросанных во времени пиковых значений на выходе приемного устройства. Для устранения помехи $\mathcal{A}_k$ при суммировании дифференциально взвешенных сигналов каждого канала множество весовых функций $\{\mathbf{w}_{k,i}\}$, используемых для формирования диаграммы направленности передающих антенн должны удовлетворять условиям:

$$\sum_{i=1}^{L_k} \mathbf{w}_{k,i}^H(n) \mathbf{a}_{k,i}^{(d)}(n) = \sum_{i=1}^{L_k} \|\mathbf{a}_{k,i}^{(d)}(n)\|^2 \quad (40)$$

$$\mathbf{w}_{k,i}^H(n) \mathbf{a}_{k,i}^{(d)}(n) = 0, \quad i \neq j \quad (41)$$

где $\{\mathbf{a}_{k,i}^{(d)}(n)\}$ — векторы направления передачи сигнала по нисходящему каналу для дискретных значений n , имеющих место при формировании диаграммы направленности передающей антенны БПЛА. В (41) мы предполагаем, что число антенн M не меньше числа каналов, и применяем псевдоинверсное формирование диаграммы направленности передающей антенны с углом наклона принимаемого сигнала относительно оси диаграммы направленности принимаемой антенны [15] для устранения каждой компоненты $\mathcal{A}_k$. На основе набора предсказанных векторов направлений передачи сигнала по нисходящему каналу, весовые функции при формировании диаграммы направленности могут быть выражены в следующем виде:

$$\mathbf{w}_{k,i}(n) = \frac{\|\tilde{\mathbf{a}}_{k,i}^{(d)}(n)\|^2 (\mathbf{I} - \mathbf{P}_i) \tilde{\mathbf{a}}_{k,i}^{(d)}(n)}{\|(\mathbf{I} - \mathbf{P}_i) \tilde{\mathbf{a}}_{k,i}^{(d)}(n)\|^2} \quad (42)$$

где $\mathbf{P}_i$ — ортогональная проекция на поверхность, образованную множеством $\{\tilde{\mathbf{a}}_{k,i}^{(d)}(n), i \neq j\}$. Для противодействия замираниям в нисходящем канале вектор каждой весовой функции нормируется коэффициентом канала в момент n .

$$\mathbf{w}_{k,i}(n) = \frac{\beta}{\sum_{i=1}^{L_k} \|\tilde{\mathbf{a}}_{k,i}^{(d)}(n)\|^2} \times \frac{\|\tilde{\mathbf{a}}_{k,i}^{(d)}(n)\|^2 (\mathbf{I} - \mathbf{P}_i) \tilde{\mathbf{a}}_{k,i}^{(d)}(n)}{\|(\mathbf{I} - \mathbf{P}_i) \tilde{\mathbf{a}}_{k,i}^{(d)}(n)\|^2} \quad (43)$$

где β — постоянная, которая учитывает ограничения на мощность передаваемых сигналов. В дальнейшем, для простоты полагаем $\beta = 1$. Нормированная компонента в момент n одинаковая для всех векторов весовой функции, выделенных для сигнала на входе k -ой мобильной станции, следовательно, происходит суммирова-

ние дифференциально взвешенных сигналов каждого канала. Мы предполагаем, что векторы направлений передачи сигналов $\mathbf{a}_{k,i}$ и $\mathbf{a}_{k,j}$ не соприкасаются в векторном пространстве, т.е. находятся на удаленном расстоянии, если распространение сигнала по соответствующим каналам обладает временными задержками. Следовательно, знаменатель в (43) не будет таким малым по величине по значению и не вызовет ошибку при обработке сигналов.

Схему формирования диаграммы направленности передающей антенны БПЛА можно представить следующим образом. В пределах длительности пакета передаваемых данных по нисходящему каналу передатчик БПЛА передает сигнал $\mathbf{s}^{(d)}(t)$, определенный в (38), используя множество векторов весовых функций $\{\mathbf{w}_{k,i}(n)\}, n = N + L_b, N + 2L_b, \dots$, определяемых (43) при $t \in [(n - 0.5L_b)T_s, (n + 0.5L_b)T]$. Заметим, что в начальный момент передачи информационных данных по нисходящему каналу $t \in [NT_s, (N + 0.5L_b)T]$ вектора весовых функций генерируются на основе оцениваемых или возвращаемых по каналу обратной связи векторов направлений передачи сигналов $\{\hat{\mathbf{a}}_{k,i}^{(d)}(N)\}$.

Анализ характеристик. Поскольку собственные или взаимные помехи подавляются предлагаемым формированием диаграммы направленности передающей антенны БПЛА, создается возможность синхронизировать приемный канал k -ой мобильной станции с информационным сигналом. На выходе приемного устройства мобильной станции, синтезированного на основе обобщенной методологии обработки сигналов на фоне помех, формируется процесс, который можно представить в следующем виде:

$$z_k(n) = \int_{(n-1)T_s}^{nT_s} g_k(t - nT_s)[a_k^*(t)x_k(t) - x_k^2(t) + \Xi_k(t)]dt = D_k(n) + S_k(n) + A_k(n) + \Sigma_k(n) \quad (44)$$

где $D_k(n)$ — энергия сигнала, передаваемого от БПЛА к мобильной станции; $S_k(n)$ — собственные или взаимные помехи; $A_k(n)$ — межсимвольные помехи; $\Sigma_k(n)$ — совокупная фоновая помеха, формирующаяся на выходе приемного устройства, синтезированного на основе обобщенной методологии обработки сигналов на фоне помех. Полагая, что вектор направления передаваемых сигналов $\mathbf{a}_{k,i}^{(d)}(n)$ не изменяется в пределах периода передачи символа T_s , и спектр модулирующего сигнала $g_k(n)$ при использовании технологии множественного доступа с кодовым разделением каналов порождает незначительное перекрытие спектра символьных сигналов, мы получаем

$$D_k(n) = \sqrt{G}b_k(n) \sum_{i=1}^{L_k} \mathbf{w}_{k,i}^H(n^*) \mathbf{a}_{k,i}^{(d)}(n) \quad (45)$$

$$S_k(n) = \sum_{i \neq j} \mathbf{w}_{k,i}^H(n^*) \mathbf{a}_{k,i}^{(d)}(n) \sum_m b_k(m) \int_{(n-1)T_s}^{nT_s} g_k(t - nT_s) g_k(t - mT_s + \tau_{k,j} - \tau_{k,i}) dt \quad (46)$$

$$A_k(n) = \sum_{l=1, l \neq k}^K \sum_{i,j} \mathbf{w}_{l,i}^H(n^*) \mathbf{a}_{k,i}^{(d)}(n) \sum_m b_l(m) \int_{(n-1)T_s}^{nT_s} g_k(t - nT_s) g_k(t - mT_s + \tau_{l,j} - \tau_{k,i}) dt \quad (47)$$

$$\Sigma_k(n) = \int_{(n-1)T_s}^{nT_s} g_k(t - nT_s)[\eta_k^2(t) - \xi_k^2(t)]dt \quad (48)$$

где n^* — принимает значения $N, N + L_b, N + 2L_b, \dots$. Предполагаем, что модулирующие сигналы при использовании технологии множественного доступа с кодовым разделением каналов представляют собой сигналы с кодом расширения спектра ± 1 элементарного сигнала (импульса). Следовательно, совокупная фоновая помеха $\Sigma_k(n)$ в предельном случае может рассматриваться как гауссовский случайный процесс с нулевым математическим ожиданием и дисперсией $4T_s^2 \sigma_n^4$, где σ_n^2 — дисперсия входного гауссовского шума. Мы предполагаем автокорреляцию модулирующего сигнала с малым значением сдвига по фазе. Также полагаем, что модулирующие сигналы для интерферирующих каналов представляются как взаимная коррелированная помеха. Используя гауссовскую аппроксимацию, мы представляем собственные и межсимвольные помехи как гауссовские случайные процессы. Нетрудно продемонстрировать, что собственные и межсимвольные помехи являются независимыми между собой и обладают нулевым математическим ожиданием [11]. Нас интересует только дисперсия случайных процессов $S_k(n)$ и $A_k(n)$, которая оценивается на основе частного множества $\{\mathbf{a}_{k,i}^{(d)}(n)\}$ и усредняется по всем возможным значениям этого процесса.

Отношение сигнал/(помеха + шум), обозначаемое как $SINR$ для k -ой мобильной станции может быть представлено в виде

$$SINR_k = \frac{|D_k(n)|^2}{\sqrt{Var[S_k(n)] + Var[A_k(n)] + Var[\Sigma_k(n)]}} = \frac{|D_k(n)|^2}{\sqrt{E[|S_k(n)|^2] + E[|A_k(n)|^2] + E[|\Sigma_k(n)|^2]}}$$

$$= \frac{|D_k(n)|^2}{\sqrt{E[|S_k(n)|^2] + E[|A_k(n)|^2] + 4T_s^2 \sigma_n^4}} \quad (49)$$

где

$$|D_k(n)|^2 = T_s^2 \left| \sum_{i=1}^{L_k} \mathbf{w}_{k,i}^H(n^*) \mathbf{a}_{k,i}^{(d)}(n) \right|^2 \quad (50)$$

Предполагаем, что символы некоррелированные как между собой, так и для различных пользователей. Следовательно, при наличии множества $\{\mathbf{a}_{k,i}^{(d)}(n)\}$ дисперсии могут быть представлены в виде суммирования второго момента каждого компонента, т.е.

$$E[|S_k(n)|^2 \{\mathbf{a}_{k,i}^{(d)}(n)\}] = \sum_{i \neq j} |\mathbf{w}_{k,i}^H(n^*) \mathbf{a}_{k,i}^{(d)}(n)|^2 G(\tau_{k,j}, \tau_{k,i}) \quad (51)$$

$$E[|A_k(n)|^2 \{\mathbf{a}_{k,i}^{(d)}(n)\}] = \sum_{l=1, l \neq k}^K \sum_{i,j} |\mathbf{w}_{l,i}^H(n^*) \mathbf{a}_{k,i}^{(d)}(n)|^2 G(\tau_{l,j}, \tau_{k,i}) \quad (52)$$

$$G(\tau_{l,j}, \tau_{k,i}) = E \left\{ \left\{ \sum_m b_l(m) \int_{-T_s}^0 g_k(t) g_l[t + (n - m)T_s + \tau_{l,j} - \tau_{k,i}] dt \right\}^2 \right\} \\ = \sum_m \left\{ \left\{ \int_{-T_s}^0 g_k(t) g_l[t + (n - m)T_s + \tau_{l,j} - \tau_{k,i}] dt \right\}^2 \right\} \quad (53)$$

При $l \neq k$ для межсимвольной помехи $A_k(n)$ возможны следующие случаи: а) если $\text{mod}(|\tau_{l,j} - \tau_{k,i}|, T_s) = 0$ и используются периодические ортогональные коды или, если $\tau_{l,j} - \tau_{k,i} = 0$ и используются аperiodические ортогональные коды, тогда $G(\tau_{l,j} - \tau_{k,i}) = 0$. Следовательно, мы получаем следующее выражение

$$SINR_{k|\{\mathbf{a}_{k,i}^{(d)}(n)\}} = \frac{T_s^2 \left| \sum_{i=1}^{L_k} \mathbf{w}_{k,i}^H(n^*) \mathbf{a}_{k,i}^{(d)}(n) \right|^2}{\sum_{i \neq j} |\mathbf{w}_{k,i}^H(n^*) \mathbf{a}_{k,i}^{(d)}(n)|^2 G(\tau_{k,j}, \tau_{k,i}) + \sum_{l=1, l \neq k}^K \sum_{i,j} |\mathbf{w}_{l,i}^H(n^*) \mathbf{a}_{k,i}^{(d)}(n)|^2 \mu G(\tau_{l,j}, \tau_{k,i}) + 4T_s^2 \sigma_n^4} \quad (54)$$

где при $\mu = 0$ ортогональность кодов выполняется, а при $\mu = 1$ — нет. При прогнозировании с высокой степенью точности параметров канала связи и постоянно управляемым формированием диаграммы направленности передающей антенны, при $\beta = 1$ в (43) мы получаем

$$SINR_{k|\{\mathbf{a}_{k,i}^{(d)}(n)\}} = \frac{T_s^2}{\sum_{l=1, l \neq k}^K \sum_{i,j} |\mathbf{w}_{l,i}^H(n) \mathbf{a}_{k,i}^{(d)}(n)|^2 \mu G(\tau_{l,j}, \tau_{k,i}) + 4T_s^2 \sigma_n^4} \quad (55)$$

Предположим, что $y_k(n)$ представляет собой гауссовский случайный процесс. В этом случае, вероятность ошибки приема сигнала, передаваемого k -ой мобильной станцией при условии наличия множества $\{\mathbf{a}_{k,i}^{(d)}(n)\}$ может быть представлена в виде:

$$P_{error}(y_k(n) | \{\mathbf{a}_{k,i}^{(d)}(n)\}) = Q \left(\sqrt{SINR_{k|\{\mathbf{a}_{k,i}^{(d)}(n)\}}} \right) \quad (56)$$

где $Q(\cdot)$ — стандартная Q -функция. Вероятность ошибки $P_{error}(y_k(n) | \{\mathbf{a}_{k,i}^{(d)}(n)\})$ оценивается, используя интегрирование Монте-Карло по всем возможным значениям множества $\{\mathbf{a}_{k,i}^{(d)}(n)\}$.

Весовые функции диаграммы направленности передающей антенны генерируются на основе прогнозирования векторов направления передачи сигналов от БПЛА к мобильной станции и фиксируются в пределах временного периода $[(n' - 0.5L_b)T_s, (n' + 0.5L_b)T_s]$. Неточное определение весовых функций и ошибки прогнозирования относительно параметров канала связи могут вызывать ухудшение характеристик системы в целом. Мы рассматриваем воздействие ошибок на прогнозирование параметров формирования диаграммы направленности антенны, передающей сигналы от БПЛА к мобильной станции, в случае наличия одного канала. Предполагая существование только одного канала между БПЛА и мобильным объектом, мощность принимаемого сигнала оценивается следующим образом:

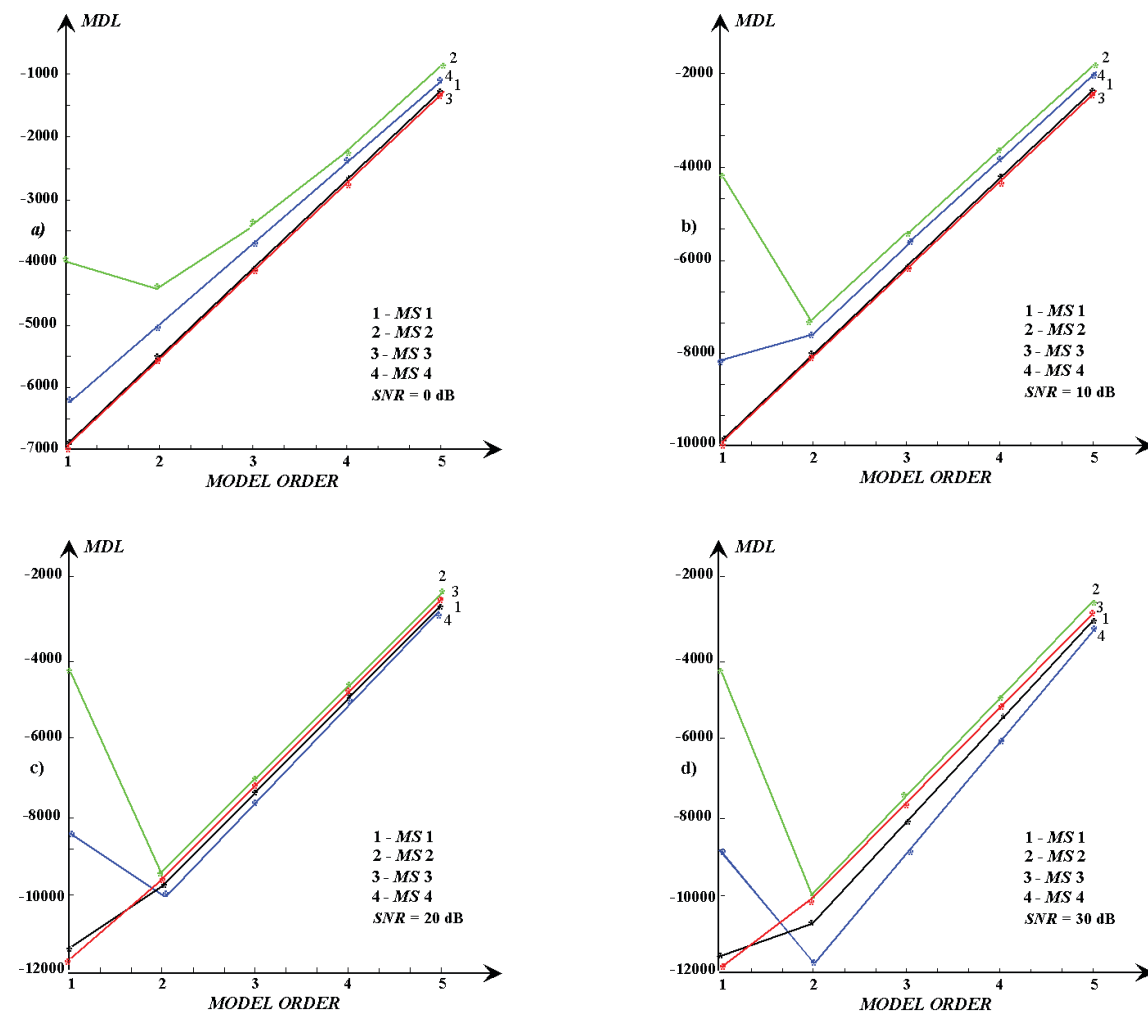


Рис.1. Критерий описания минимальной длины кодов для определения порядка модели канала связи и маршрутов с наибольшим разрешением принимаемых сигналов при различных значениях SNR

$$|D_k(n)|^2 = T_s^2 \gamma_k^2(n) \quad (57)$$

и полученное $SINR$, зависящее от множества $\{a_{k,i}^{(d)}(n)\}$, определяется в виде

$$SINR_{k|\{a_{k,i}^{(d)}(n)\}} = \frac{T_s^2 \gamma_k^2(n)}{\sum_{l=1, l \neq k}^K \sum_{i,j} |w_{l,i}^H(n) a_{k,i}^{(d)}(n)|^2 \mu G(\tau_{l,i}, \tau_{k,i}) + 4T_s^2 \sigma_n^4} \quad (58)$$

где $\gamma_k(n)$ представляет собой ошибку прогнозирования, которая определяется в (37).

Моделирование и обсуждение результатов

При моделировании предполагалось, что БПЛА взаимодействует с четырьмя мобильными станциями посредством 8-элементной однородной круговой антенны. Расстояние между элементами антенной решетки равно половине длины волны несущего колебания. Частота несущего колебания при передаче сигнала от БПЛА к мобильной станции выбиралась равной 1,8 ГГц. Каждый элемент антенной решетки БПЛА представляет собой вертикально расположенную дипольную антенну с круговым обзором. Каждая мобильная станция оснащена вертикально расположенной дипольной антенной с круговым обзором, которая находится за пределами прямой видимости антенны БПЛА. Мы

предполагаем, что наибольший по энергетическому уровню сигнал синхронизируется с приемным устройством БПЛА.

Рассматриваются два случая для технологии множественного доступа с кодовым разделением каналов при различных значениях пропускной способности. Передаваемые символы модулируются с помощью квадратурной фазовой модуляции и обладают расширенным спектром при использовании кодов Уолша, зашифровываются псевдослучайной полной кодовой последовательностью. Импульсные характеристики фильтров передающего и приемного устройств определяются функциональной зависимостью, эквивалентной извлечению квадратного корня из колебания косинусоидальной формы с коэффициентом сглажи-

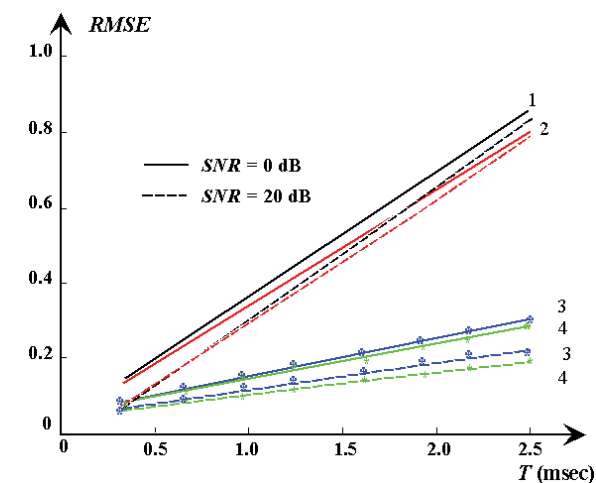


Рис.2. Нормализованные среднеквадратические ошибки прогнозирования параметров канала связи (RMSE):

- 1 – текущий момент времени, частотное разделение каналов;
- 2 – текущий момент времени, временное разделение каналов;
- 3 – прогнозирование параметров, частотное разделение каналов;
- 4 – прогнозирование параметров, временное разделение каналов

вания равным 0,35. Рассматриваемая система с множественным доступом и кодовым разделением каналов функционирует либо в режиме дуплексной связи с временным разделением каналов при одной и той же частоте несущего колебания, равной 1,8 ГГц как при передаче сигналов от БПЛА к мобильным станциям, так и при передаче сигналов от мобильных станций к БПЛА, либо в режиме дуплексной связи с частотным разделением каналов при частоте несущего колебания, равной 1,8 ГГц при передаче сигналов от БПЛА к мобильным станциям, и равной 2,0 ГГц при передаче сигналов от мобильных станций к БПЛА. Несмотря на тот факт, что разнесение по частоте несущего колебания при частотном разделении каналов составляет около 10% частоты несущего колебания, мы применяем авторегрессионные коэффициенты, полученные из данных, передаваемых от БПЛА к мобильным станциям, непосредственно для прогнозирования параметров канала связи, по которому передаются данные от мобильных станций к БПЛА. Управление или контроль энергетических характеристик сигналов, передаваемых от БПЛА к мобильным станциям, применяется для компенсации помех при удаленной радиосвязи с мобиль-

ными станциями. Принимаемый и передаваемый пакет данных имеет одну и ту же длительность, равную 2,5 мсек.

Случай 1. В пределах пакета данных длительностью 2,5 мсек передается 320 последовательных символов. При коэффициенте расширения спектра передаваемого сигнала, равного 8, исполь-

зуя технологию множественного доступа с кодовым разделением сигналов, скорость передачи элементарных посылок сигнала равна 1024 Мбайт/сек и дальность распространения в течение периода одного элементарного сигнала равна приблизительно 293 метра. Разброс по задержке передачи сигналов от четырех мобильных станций не превышает периода одного элементарного сигнала. Мы используем одноканальное приемное устройство для приема копии сигнала, переданного посредством многолучевого разнесения, т.е. БПЛА использует приемное устройство для разнесенных сигналов, полагая, что это одноканальное приемное устройство синхронизируется с передачей сигнала наибольшей мощности от мобильных станций.

Предполагая высокую вероятность обнаружения информационных сигналов, биты обнаруженных информационных сигналов используются для определения параметров нисходящего канала связи между БПЛА и мобильными станциями. На рис. 1 представлено использование критерия описания минимальной длины кодов для определения порядка модели канала связи и маршрутов с наибольшим разре-

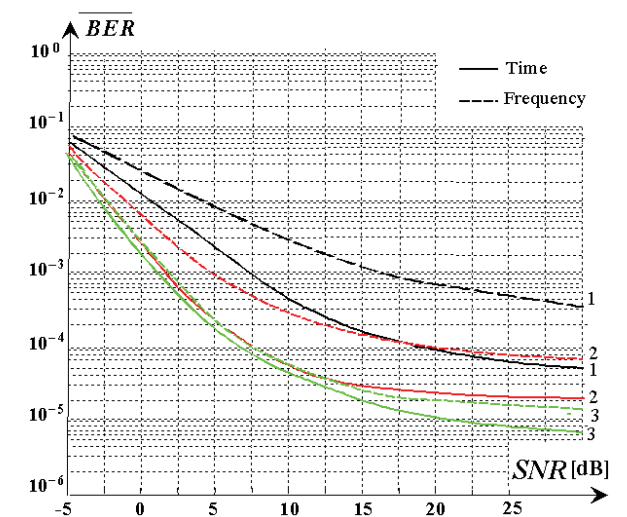


Рис.3. Усредненная вероятность ошибок на бит как функция от отношения сигнал/помеха в канале связи при временном и частотном разделении каналов. Скорость движения мобильной станции 45 км/час. Частота передачи данных 1.024 МГц:

- 1 – общепринятое формирование диаграммы направленности, быстрые замирания;
- 2 – предсказанное формирование диаграммы направленности, быстрые замирания;
- 3 – общепринятое формирование диаграммы направленности, замирания отсутствуют

шением принимаемых сигналов. При большом значении отношения сигнал/помеха в канале связи оцениваемые порядки модели исходящего канала были выбраны равными 1 и 2. Подобный выбор хорошо согласуется с многолучевым распространением сигналов, представленным в [33]–[36]. Порядок модели можно интерпретировать как число преобладающих направлений распространения и приема сигналов мобильными станциями в силу независимости доплеровских частот. При прогнозировании параметров нисходящего канала связи между БПЛА и мобильными станциями используется модель с порядком $p = 2$ для каждой мобильной станции.

Данные в пределах периода одного пакета длительностью 2,5 мсек, передаваемые от БПЛА к мобильной станции используются для прогнозирования данных, которые будут переданы в течение последующих 2,5 мсек от мобильных станций к БПЛА. Диаграмма направленности передающей антенны БПЛА контролируется восемь раз даже при передаче сигнала в течение 2,5 мсек. Таким образом, частота формирования диаграммы направленности передающей антенны равна 3,2 КГц, т.е., $f_b = 3,2$ КГц. Модель восходящего канала передачи данных от мобильной станции к БПЛА понижает свое качество в части разрешения по частоте согласно результатам, представленным в разделе, где обсуждаются параметры восходящего канала связи при передаче данных от мобильных станций к БПЛА. На рис. 2 представлены нормализованные среднеквадратические ошибки прогнозирования параметров канала связи (RMSE), определяемые в фиксированные моменты времени (восемь отсчетов) при передаче данных по нисходящему каналу с целью дальнейшего определения параметров восходящего канала передачи данных от мобильных станций к БПЛА. Среднеквадратические ошибки усредняются при передаче сигналов по нисходящему каналу для четырех мобильных станций к БПЛА. Результат усреднения сравнивается со среднеквадратическими ошибками определения параметров восходящего ка-

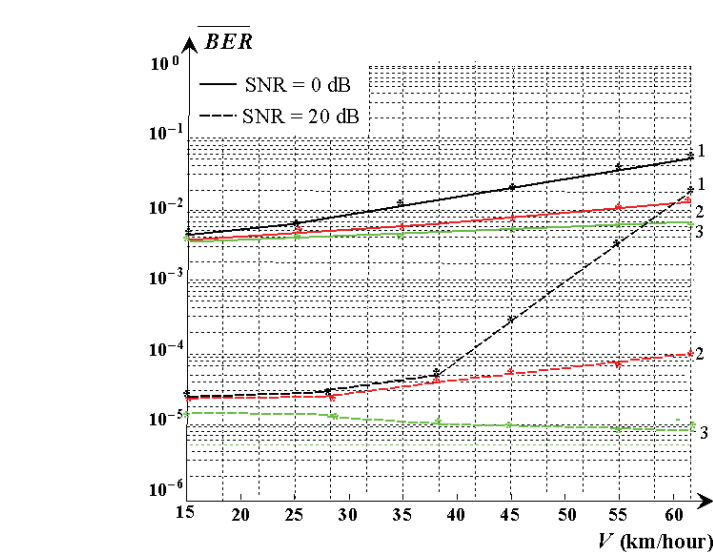


Рис. 4. Средняя вероятность ошибки на бит в зависимости от скорости движения мобильной станции. Частота передачи данных 1.024 МГц. Временное разделение каналов:

- 1 – общепринятое формирование диаграммы направленности, быстрые замирания;
- 2 – предсказанное формирование диаграммы направленности, быстрые замирания;
- 3 – общепринятое формирование диаграммы направленности, замирания отсутствуют

нала связи для передачи данных от мобильных станций к БПЛА в текущий момент времени и в последующие моменты времени как для дуплексных систем связи с временным разделением каналов, так и для дуплексных систем связи с частотным разделением каналов. Уменьшение нормализованной ошибки, как при низких, так и высоких значениях отношения сигнал/помеха в канале связи, демонстрирует тот факт, что прогнозирование параметров канала связи обеспечивает достаточное знание относительно изменения параметров канала связи в последующие моменты времени.

На рис. 3 представлена усредненная вероятность ошибок на бит при приеме сигналов с квадратной фазовой модуляцией при наличии рэлеевских замираний и аддитивного белого гауссовского шума в канале связи в зависимости от отношения сигнал/помеха на входе приемного устройства от мобильных станций к БПЛА. Частота передачи данных равна 1.024 МГц. Каждая из 4-х мобильных станций движется со скоростью 45 км/час. Нисходящий канал связи подвергается воздействию рэлеевских замираний плюс аддитивный белый гауссовский шум на входе приемного устройства мо-

бильной станции. Мы сравниваем прогнозируемое формирование диаграммы направленности с общепринятым формированием диаграммы направленности передающей антенны без прогнозирования при фиксированных весовых функциях в пределах длительности одного пакета передаваемых данных. Фиксированные весовые функции генерируются на основе текущей информации об основных параметрах восходящего канала связи при передаче сигналов от мобильных станций к БПЛА, причем восходящий канал связи может функционировать в дуплексном режиме с временным разделением каналов или при наличии обратной связи в нисходящем канале в дуплексном режиме с частотным разделением каналов. Из рис. 3 следует, что как для дуплексного режима связи с временным разделением каналов, так и для дуплексного режима связи с частотным разделением каналов, прогнозируемое формирование диаграммы направленности передающей антенны обеспечивает значительное качественное улучшение характеристик системы. При вероятности ошибок на бит равной 10⁻³ прогнозирование формирования диаграммы направленности передающей ан-

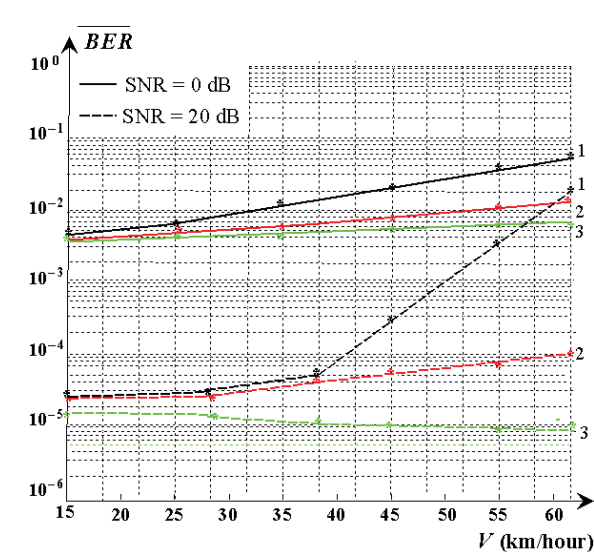


Рис. 5. Усредненная вероятность ошибок на бит как функция от отношения сигнал/помеха в канале связи при временном и частотном разделении каналов. Скорость движения мобильной станции 45 км/час. Частота передачи данных 4.096 МГц. Предварительная фильтрация передаваемых сигналов:

- 1 – общепринятое формирование диаграммы направленности, быстрые замирания;
- 2 – предсказанное формирование диаграммы направленности, быстрые замирания;
- 3 – общепринятое формирование диаграммы направленности, замирания отсутствуют

тенны дает выигрыш порядка 10 дБ для дуплексных систем связи с временным разделением каналов и 3 дБ для дуплексных систем связи с частотным разделением каналов. Характеристики прогнозируемого формирования диаграммы направленности передающей антенны в случае быстрых замираний в канале связи приближаются к характеристикам общепринятого формирования диаграммы направленности передающей антенны без прогнозирования для случая отсутствия замираний в канале связи. Большая вероятность ошибок на бит в дуплексных системах связи с частотным разделением каналов обусловлена большим разбросом доплеровских частот, причем, частота несущего колебания 1,8 ГГц характерна для дуплексных систем связи с временным разделением каналов и 2,0 ГГц – для дуплексных систем связи с частотным разделением каналов. Верхний предел вероятности ошибок на бит при больших значениях отношения сигнал/помеха в канале связи обусловлен тем, что, несмотря на то, что мощность аддитивного белого шума мала по величине, всегда присутствуют определенные собственные поме-

хи при моделировании многолучевого распространения сигналов.

На рис. 4 представлена средняя вероятность ошибки на бит при приеме сигналов с квадратной фазовой модуляцией при наличии рэлеевских замираний и аддитивного белого гауссовского шума в дуплексной системе связи с временным разделением каналов связи при движении мобильных станций со скоростью от 15 до 75 км/час. Частота передачи данных равна 1.024 МГц. Все четыре мобильные станции движутся с одинаковой скоростью и обмениваются информационными сигналами с БПЛА в режиме дуплексной системы связи с временным разделением каналов. Отношение сигнал/помеха на входе приемного устройства как БПЛА, так и мобильной станции, изменяется в пределах от 0 до 20 дБ. При увеличении скорости движения мобильной станции параметры восходящего канала связи изменяются очень быстро. При использовании общепринятой технологии формирования диаграммы направленности передающей антенны с фиксированными весовыми функциями характеристики беспроводной системы связи ухудшаются. При

прогнозировании диаграммы направленности передающей антенны характеристики беспроводной системы связи устойчивы по отношению к изменению скорости движения мобильной станции. При большом значении скорости движения мобильной станции и отношении сигнал/помеха в канале связи равном 20 дБ, вероятность ошибки на бит может быть уменьшена на порядок по величине. Это обуславливается прогнозированием быстрого изменения параметров канала связи и компенсируется своевременным управлением весовых функций при формировании диаграммы направленности антенны, передающей сигналы по нисходящему каналу от БПЛА к мобильным станциям.

Случай 2. Присутствует 1280 последовательных символов в пакете данных длительностью 2,5 мсек. Частота посылки элементарных сигналов 4096 МГц. Дальность распространения за время длительности одного элементарного сигнала равна 173 метра. Разброс по задержкам для 2-й и 4-й мобильных станций составляет около 5 интервалов длительности элементарного сигнала, что больше полупериода передачи символа. Следовательно, мы извлекаем вектора направления распространения сигналов из двух наиболее доминантных с точки зрения разрешения направлений при передаче сигналов от каждой мобильной станции к БПЛА и применяем 2-х канальное передающее устройство с предварительной фильтрацией передаваемых сигналов с учетом полной информации о параметрах восходящего канала связи для передачи информации по нисходящему каналу, т.е., от БПЛА к мобильным станциям. В случае дуплексной системы связи с частотным разделением каналов, предполагается наличие управляющего сигнала (пилот-сигнал) для нисходящего канала и обратной связи, которая свободна от ошибок.

На рис. 5 представлена средняя вероятность ошибок на бит при приеме сигналов с квадратной фазовой модуляцией приемным устройством мобильных станций при наличии рэлеевских замираний и аддитивного белого

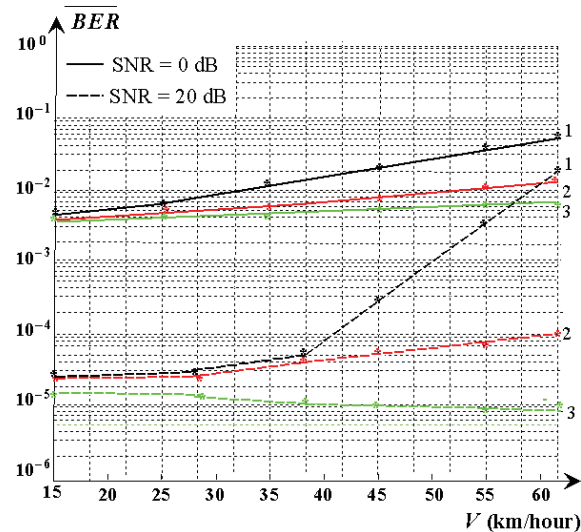


Рис.6. Усредненная вероятность ошибок на бит как функция от отношения сигнал/помеха в канале связи при временном разделении каналов. Частота передачи данных 4.096 МГц. Предварительная фильтрация:

- 1 – общепринятое формирование диаграммы направленности, быстрые замирания;
2 – предсказанное формирование диаграммы направленности, быстрые замирания;
3 – общепринятое формирование диаграммы направленности, замирания отсутствуют.

гауссовского шума в дуплексной системе связи с временным и частотным разделением каналов связи. Скорость движения мобильной станции 45 км/час. Частота передачи данных 4.096 МГц. При общепринятом формировании диаграммы направленности передающей антенны БПЛА используются фиксированные весовые функции для каждого направления при предварительной фильтрации передаваемых сигналов с учетом полной информации о параметрах восходящего канала связи во время передачи одного пакета данных от БПЛА к мобильной станции. При прогнозировании формирования диаграммы направленности передающей антенны предварительная фильтрация передаваемых сигналов с учетом полной информации о параметрах восходящего канала связи используется при динамическом формировании диаграммы направленности передающей антенны. Как следует из результатов, представленных на рис. 5, при вероятности ошибок на бит 5×10^{-3} прогнозируемое формирование диаграммы направленности передающей антенны демонстрирует выигрыш в 6 дБ для дуплексной системы связи с временным разделением каналов и 2 дБ для

дуплексной системы связи с частотным разделением каналов, соответственно. Характеристика системы при передаче сигналов с предварительной фильтрацией с учетом полной информации о параметрах восходящего канала связи при прогнозируемом формировании диаграммы направленности передающей антенны по каналам с быстрыми замираниями почти совпадает с аналогичной характеристикой при общепринятой предварительной фильтрации передаваемых сигналов с учетом полной информации о параметрах канала связи при отсутствии замирания в канале связи. Более высокий уровень ошибок по сравнению с результатами, представленными для случая 1, обуславливается взаимными помехами за счет многолучевого распространения сигналов (многолучевой интерференции) для широкополосных систем беспроводной связи.

На рис. 6 представлена средняя вероятность ошибки на бит при приеме сигналов с квадратной фазовой модуляцией при наличии рэлеевских замирания и аддитивного белого гауссовского шума в дуплексной системе связи с временным разделением каналов связи при движении мо-

бильных станций со скоростью от 15 до 75 км/час. Частота передачи данных равна 4.096 МГц. Все четыре мобильные станции движутся с одинаковой скоростью и обмениваются информационными сигналами с БПЛА в режиме дуплексной связи с временным разделением каналов. Когда БПЛА передает сигналы, подвергшиеся предварительной фильтрации с учетом полной информации о параметрах восходящего канала связи с прогнозируемым формированием диаграммы направленности передающей антенны, вероятность ошибки на бит при приеме сигналов приемным устройством мобильной станции устойчива по отношению к изменению скорости движения мобильной станции как при больших, так и при малых значениях отношения сигнал/помеха на входе приемного устройства.

Выводы

В настоящей работе рассматривается подход, основанный на прогнозировании формирования диаграммы направленности передающей антенны при передаче сигналов от мобильной станции к БПЛА, что эффективно снижает воздействие быстрых рэлеевских замирания в каналах беспроводных систем связи. Прогнозирование параметров восходящего канала связи требует усложнения архитектуры приемных устройств и беспроводной системы связи в целом, т.к. эта процедура основана на линейном предсказании, используя авторегрессионную модель. Алгоритм формирования диаграммы направленности передающей антенны достаточно эффективен для широкополосных беспроводных систем дуплексной связи с временным разделением каналов, благодаря разомкнутой петле обратной связи, и может использоваться в дуплексных системах связи с частотным разделением каналов, используемых на практике при наличии управляющих сигналов при передаче информационных данных от мобильной станции к БПЛА. Для широкополосных беспроводных систем связи мы сочетаем прогнозируемое формирование диаграммы

направленности передающей антенны с предварительной фильтрацией передаваемых сигналов при наличии полной информации о параметрах нисходящего канала связи с целью улучшения характеристик приема сигналов при передаче информационных данных от БПЛА к мобильной станции, сохраняя при этом простоту архитектуры приемного устройства мобильной станции. Результаты

моделирования трассировки многолучевого распространения сигналов демонстрируют улучшение характеристики беспроводных систем связи при прогнозировании параметров формирования диаграммы направленности антенны, передающей сигналы от БПЛА к мобильной станции по сравнению с общепринятыми методами формирования диаграммы направленности антенны, переда-

ющей информационные данные от мобильной станции к БПЛА по сравнению с общепринятыми методами формирования диаграммы направленности передающей антенны для беспроводных систем связи, сконструированных по технологии множественного доступа с кодовым разделением каналов с высокой скоростью передвижения мобильной станции.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Krim, H, Viberg, M. Two decades of array signal processing research: The parametric approach / H. Krim, M. Viberg // IEEE Signal Processing Magazine. – 1996. – 13(4). – P. 67–94.
2. Paulraj, A, Papadias, C. Space-time processing for wireless communications / A. Paulraj, C. Papadias // IEEE Signal Processing Magazine. – 1997. – 14 (6). – P. 49–83.
3. Viterbi, A.J. CDMA: Principles of Spread Spectrum Communication. 1995/ A.J. Viterbi. – Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1995.
4. Jinchao Bao, Zheng Ma, Karagiannis, G.K., Ming Xiao, Zhongliang Zhu, Joint multiuser detection of multidimensional constellation over fading channels / Bao Jinchao, Ma Zheng // IEEE Transactions on Communications. – 2017. – 65 (1). – P. 161–172.
5. Vempati, S.R., Khan, H., Tippiati, A. Multiuser detection using particle swarm optimization over fading channels with impulsive noise / S.R. Vempati, H., Khan // Journal of Communications. – 2016. – 11 (1). – P. 23–32.
6. Raju, B., Rao, D. Robust multiuser detection in chaotic communication systems over non-Gaussian fading channels / B. Raju, D. Rao // IETE Journal of Research. – 2012. – 58 (4). – P. 259–265.
7. Wang, D. The multiuser detection under fading channel / D. Wang, T. Duan // Digital Signal Processing. – 2014. – 21 (1). – P. 59–63.
8. Eyceoz, T., Duel-Hallen, A., Hallen, H. Deterministic channel modeling and long range prediction of fast fading mobile radio channels / T. Eyceoz, A. Duel-Hallen // IEEE Communications Letters. – 1998. – 2 (9). – P. 255–256.
9. Duel-Hallen, A., Hu, S., Hallen, H. Long-range prediction of fading signals: Enabling adaptive transmission for mobile radio channels / A. Duel-Hallen, S. Hu // IEEE Signal Processing Magazine. – 2000. – 17 (3). – P. 62–75.
10. Arredondo, A. Dandekar, K.R., Xu, G. Vector channel modeling and prediction for the improvement of downlink received power / A. Arredondo, K.R. Dandekar // IEEE Transactions on Communications. – 2002. – 50 (7). – P. 1121–1129.
11. Esmailzadeh, R., Sourour, E., Nakagawa, M. Prerake diversity combining in time-division duplex CDMA mobile communications / R. Esmailzadeh, E. Sourour // IEEE Transactions on Vehicle Technology. – 1999. – 48 (5). – P. 795–801.
12. Choi, R.L.-U., Letaief, K.B., Murch, R.D. MISO CDMA transmission with simplified receiver for wireless communication handsets / R.L.-U. Choi, K.B. Letaief // IEEE Transactions on Communications. – 2001. – 49 (5). – P. 888–898.
13. Hadda, R. BER performance of antenna array based receiver using multiuser detection in a multipath channel / R. Hadda // International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN). – 2013. – 5 (3). – P. 93–102.
14. Proakis, J.G., Salehi, M. Digital Communications. 5th Edition. / J.G. Proakis, M. Salehi. – New York: McGraw-Hill, Inc., USA. – 2008.
15. Jeng, S.-S., Okamoto, G.T., Xu, G., Lin, H.-P., Vogel, W.J. Experimental evaluation of smart antenna system performance for wireless communications / S.-S. Jeng, G.T. Okamoto // IEEE Transactions on Antenna Propagation. – 1998. – 46 (6). – P. 749–757.
16. Tuzlukov, V. A new approach to signal detection theory / V. Tuzlukov // Digital Signal Processing. – 1998. – 17 (3). – P. 62–75.
17. Tuzlukov, V. Signal Detection Theory / V. Tuzlukov. – New York: Springer-Verlag, 2001. – P. 746.
18. Tuzlukov, V. Signal Processing Noise / V. Tuzlukov. – Boca Raton, London, New York, Washington, D.C.: CRC Press, USA, 2002. – P. 692.
19. Tuzlukov, V. DS-SS Downlink Systems with Fading Channel Employing the Generalized Receiver / V. Tuzlukov // Digital Signal Processing. – 2011. – 21 (6). – P. 725–733.
20. Maximov, M. Joint correlation of fluctuating noise at outputs of frequency filters / M. Maximov // Radio Engineering. – 1956. – No.9. – P. 28–38.
21. Chernyak, Yu. Joint correlation of noise voltage at outputs of amplifiers with nonoverlapping responses / Yu. Chernyak // Radio Physics and Electronics. – 1960. – No.4. – P. 551–561.
22. Shbat, M., Tuzlukov, V. Evaluation of detection performance under employment of the generalized detector in radar sensor systems / M. Shbat, V. Tuzlukov // Radioengineering. – 2014. – 23 (1). – P. 50–65.
23. Тузлуков, В. Сравнительный анализ отношения мощности несущей сигнала к уровню помехи плюс шум при оптимальном уплотнении каналов и суммировании дифференциально взвешенных сигналов каждого канала / В. Тузлуков // Доклады БГУИР. – 2017. – 103 (1). – С. 26–33.
24. Jakes, W.C. Microwave Mobile Communication / W.C. Jakes. – New York: Wiley & Sons Inc., USA, 1974.
25. Therrien, C.W. Discrete Random Signals and Statistical Signal Processing / C.W. Therrien. – Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, USA, 1992.
26. Sklar, B. Rayleigh fading channels in mobile digital communication system. Part II: Mitigation / B. Sklar // IEEE Communications Magazine. – 1997. – No.7. – P. 103–109.
27. Gerlach, D. Adaptive transmitting antenna arrays with feedback / D. Gerlach, A. Paulraj // IEEE Signal Processing Letters. – 1994. – 1 (10). – P. 150–152.
28. Phoel, W.G. Performance of coded DS-SS with pilot-assisted channel estimation and linear interference suppression / W.G. Phoel, V.L. Honig // IEEE Transactions on Communications. – 2002. – 50 (5). – P. 822–832.
29. Cavers, J.K. An analysis of pilot symbol assisted modulation for Rayleigh fading channels / J.K. Cavers // IEEE Transactions on Vehicle Technology. – 1991. – 40 (11). – P. 686–693.

Статья поступила в редакцию
10.11.2019

УДК 621.793

А. ВОЛОЧКО, Г. МАРКОВ, А. РАЛЬКО, В. МЕДВЕДЕВ

РЕЗИСТИВНЫЕ НАГРЕВАТЕЛИ ДЛЯ СИСТЕМ АВИОНИКИ

Александр Тихонович Волочко – профессор, доктор технических наук, заведующий отделом материаловедения и литейно-деформационных технологий Физико-технического института НАН Беларуси, Республика Беларусь
volochkoat@mail.ru

Геннадий Васильевич Марков – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории микрокристаллических и аморфных материалов Физико-технического института НАН Беларуси, Республика Беларусь
volochkoat@mail.ru

Александр Павлович Ралько – младший научный сотрудник лаборатории микрокристаллических и аморфных материалов Физико-технического института НАН Беларуси, Республика Беларусь
volochkoat@mail.ru

Владимир Вячеславович Медведев – старший инженер отделения авиационной техники учебной авиационно-технической базы военного факультета учреждения образования БГАА, Республика Беларусь
ddredd2018@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты исследований по разработке резистивных нагревателей на основе покрытия системы, наносимых на диэлектрическую высокотеплопроводную подложку из оксида алюминия.

Ключевые слова: вакуумная установка, керамика, покрытия, фазовый состав, электрокорунд.

Создание новых компьютеризированных систем авионики, эксплуатирующихся при низких температурах, обуславливает разработку и использование высокоэффективных нагревательных устройств для быстрого обеспечения нормальных температурных условий работы на таких системах [1]. Основным элементом нагревательных устройств является резистивный нагреватель, представляющий собой резистивное покрытие, наносимое на изолирующую подложку. Пропускаемый через резистивное покрытие электрический ток нагревает покрытие и изолирующую подложку и тепло через подложку передаётся объекту, который необходимо нагреть. В частности, в системах авионики такие нагреватели, прикреплённые к жидкокристаллической матрице различных мониторов, позволяют им достаточно быстро выходить на рабочий режим.

В настоящее время в качестве изолирующей подложки используют ситалловые пластины, а в качестве резистивного покрытия – покрытия из хрома, тантала,

ниобия и нихрома. Коэффициент температуропроводности лучших ситаллов не превышает величину 2 Вт/(м·К), что недостаточно для эффективного нагрева и поддержания оптимальных температурных условий работы тех же жидкокристаллических матриц. При толщине пластинки в 1 мм её коэффициент теплопроводности должен быть не менее 10 Вт/(м·К). Такой величиной коэффициента обладает керамика на основе оксида алюминия.

Резистивное покрытие из хрома, ниобия, тантала, а также из нихрома при необходимом для нагревателя поверхностном сопротивлении порядка 300 Ом/квадрат обладают слишком большим температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), что весьма часто создаёт большие трудности при адаптации такого нагревателя к работе в электронных устройствах. Поэтому целью данной работы являлось исследование свойств резистивных покрытий Cr-Ni, обладающих пониженным ТКС, выбор на этой основе состава покрытия, разработка технологии его нанесения, а также

разработка высокотеплопроводных керамических материалов на основе оксида алюминия, легированных добавками TiO_2 , MgO , ZnO , MnO_2 и позволяющих снизить температуру спекания керамики в целом.

Материалы и методики

Резистивное покрытие на основе системы Cr-Ni наносилось электроннолучевым методом на установке ВУ-1А при давлении остаточных газов в вакуумной камере не более $5 \cdot 10^{-3}$ Па. Хром и никель наносились послойно и толщина каждого слоя не превышала 5 нм. Температура подложки поддерживалась на уровне 180–220°C, что приводило к диффузионному перемещению слоев прямо в процессе их нанесения. Исследуемые покрытия наносились на ситалловые подложки типа СТ-5-1-1-1.0 и свежесколотые кристаллы NaCl. Исследовались поверхностное сопротивление R и температурный коэффициент сопротивления α , а также структура и фазовый состав покрытия. Для этих целей ис-

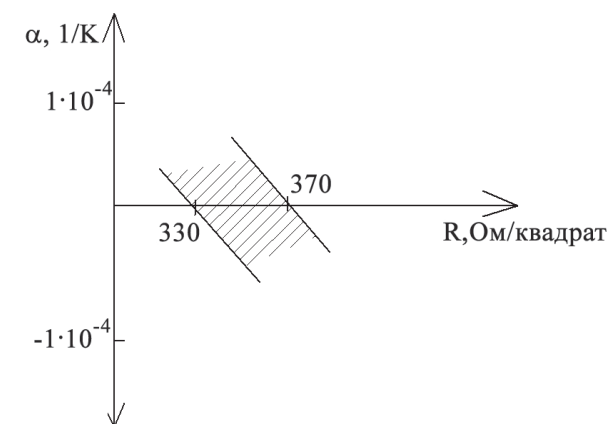


Рис.1. Зависимость термического коэффициента сопротивления от поверхностного сопротивления покрытия системы 80Cr+20Ni

пользовались четырехзондовый метод измерения сопротивления, электронограф ЭМР-102 и электронный микроскоп SEM, с установленной на нем системой энергодисперсионного микроанализа.

Подложка для электрического нагревателя должна быть изолятором, химически инертной, обладать высокой диэлектрической прочностью, гладкой поверхностью, значительным коэффициентом теплопроводности и её ТКС α , должен быть близок ТКС покрытия [2,3]. Исходя из этих требований в качестве основного керамического материала были выбраны промышленные порошки электрокорунда белого марки 25А зернистостью М1 и глинозёма марки ГН, а также в качестве легирующих добавок использовались порошки TiO_2 , MgO , ZnO , MnO_2 . Из этих порошков изготавливались образцы подложек в виде пластин размером 15х15х2 мм, спрессованных при давлении 60–120 МПа испечённый на воздухе при температуре 1450–1550°C. Коэффициент теплопроводности полученных пластин измеряли на приборе «Измеритель теплопроводности ИТ-02Ц», их шероховатость исследовалась по ГОСТ 2789 - 73 на профилометре -профилографе модели 252 типа А1, а морфология поверхности изучалась на электронном микроскопе SEM515.

Результаты исследований

При разработке состава покрытия исходили из параметров присущих используемых в насто-

ящее время резистивным нагревателям систем авионики. Согласно им, поверхностное сопротивление резистивного покрытия должно находиться в интервале 320–370 Ом/квадрат, а ТКС должен быть меньше $1 \cdot 10^{-4}$ 1/К.

Исследования начались с анализа поверхностного сопротивления покрытий из нихрома стандартного состава и сплавов с большим и меньшим содержанием Cr. Анализ полученных зависимостей R и α от толщины слоев Cr и Ni и общей толщины покрытия h показал, что удовлетворить требования к покрытию у которого $\alpha < 1 \cdot 10^{-4}$ 1/К, возможно только при увеличении содержания Cr в нём. Последовательное нанесение покрытий с R , находящимся в области 320–370 Ом/квадрат, при одновременном увеличении содержания Cr в них и уменьшение толщины слоев Ni и Cr до 5 нм

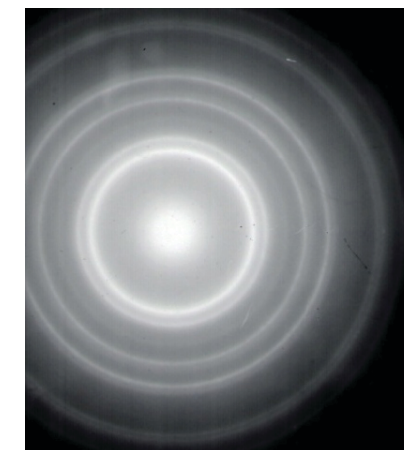


Рис.2. Электроннограмма фазового состава покрытия 80Cr+20Ni

привел к следующему результату: покрытие составом 80Cr+20Ni при $R \approx 340$ Ом/квадрат имеет $\alpha \approx 0$. Для данного состава были проведены исследования зависимости $\alpha(R)$. Результаты исследований представлены на рис.1.

Из них следует, что если поверхностное сопротивление $R < 330$ Ом/квадрат, α – положительно, а если $R > 370$ Ом/квадрат, α – отрицательно. На рис. 1 в зависимости $\alpha(R)$ выделена область (она заштрихована), где преимущественно располагаются полученные экспериментальные данные. Более точный вид зависимости $\alpha(R)$ получить не удалось.

Были проведены исследования фазового состава покрытий составом 80Cr+20Ni, которые отличались толщиной слоев Cr и Ni. Толщины слоев изменялись от 7 нм до 2 нм. На рис. 2 представлена электронограмма покрытия выше указанного состава, у которой толщина слоя Cr была 7 нм, а Ni 2 нм.

Из рис. 2 видно, что на электронограмме присутствует одно ярко выраженное кольцо и три кольца с немного меньшей интенсивностью. Здесь для Cr характерны кольца 1,3, а для никеля 2 и 4. Отжиг данного покрытия при температуре 200 и 300°C приводит к значительному уменьшению диаметра колец, что, скорее всего, является следствием увеличения межплоскостного расстояния или свидетельством образования твердого раствора Cr – Ni. Исследовалось также влияние отжига покрытия 80%Cr+20%Ni на изменение его величин R и α . Отжиг проводили пропусканием электрического тока через покрытие, а также с использованием печи, измерения величин α и R велись при комнатной температуре после отжига. Результаты исследования зависимости $R(T)$, где T – температура отжига, представлены на рис. 3.

Кривая 1 относится к отжигу в печи, а кривая 2 к отжигу посредством пропускания по покрытию электрического тока. Как видно, при отжиге в печи поверхностное сопротивление R увеличивается с ростом температуры отжига, а при ожоге проходящим электрическим током, наоборот, уменьшается. По-видимому, это объясняется тем,

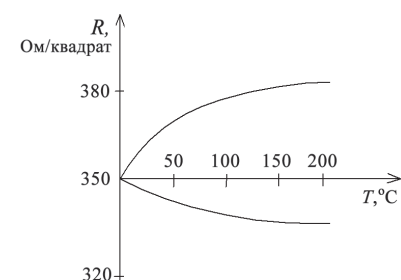


Рис.3. Влияние температуры отжига на поверхностное сопротивление покрытия 80Cr+20Ni

что при отжиге покрытия в печи в нём происходит некоторое окисление Cr по границам зерен покрытия, что повышает его поверхностное сопротивление R . Пропускание же и нагрев покрытия пропускаемым электрическим током приводит к появлению дополнительных межзеренных перемычек, что несколько снижает R . Об этом говорит и такой экспериментально обнаруженный эффект, что если покрытие, прошедшее термообработку в печи нагреть проходящим электрическим током, то его поверхностное сопротивление уменьшится на 30–20 Ом/квадрат.

Оба рассмотренных вида отжигов покрытия с $R \approx 320–370$ Ом/квадрат не приводят к изменению величины ТКС α . Также величины R и α не изменяются при термоциклировании в интервале температур 30–200°C. При этом продолжительность обоих видов отжига не превышает 3–5 минут, так как из результатов в экспериментальных исследованиях видно, что большая продолжительность отжига оказывает пренебрежимо малое влияние на величину R и α .

Кроме разработки состава и технологии нанесения резистивного покрытия с необходимыми поверхностными сопротивлением R и ТКС целью данной работы являлась разработка высокотеплопроводной керамики на основе оксида алюминия для изготовления диэлектрических подложек резистивных нагревателей, на которые наносится резистивное покрытие. В идеальном случае такая подложка должна быть изолятором, обладать химической инертностью, иметь плоскую и гладкую поверхность и высокий коэффициент теплопроводности. Для получения подложек на основе оксида алю-

миния был выбран метод полусухого статического прессования в жестких матрицах порошков корунда и глинозёма с различными добавками. В результате проведенных исследований было установлено, что наилучшей уплотняемостью обладают композиции на основе электрокорунда белого марки 25А зернистостью М1, содержащие в качестве добавок TiO_2 и ZnO [4,5]. С увеличением давления прессования от 60 до 100 МПа плотность прессовок возрастает, а при большем давлении образуются перепрессовочные трещины. Результаты исследований показывают, что оптимальными физико-механическими свойствами обладают образцы подложек состава $M1 + 2\%TiO_2 + 2\%ZnO$, спечённые на воздухе при $T = 1450^\circ C$ в течение 2 часов. Для них при усадке 17–18% достигнута кажущаяся плотность 3,7–3,8 г/см³. При этом коэффициент вязкости составил 2,5–2,7 МПа·м⁻¹, твёрдость 86,5–87,9 HRA, коэффициент теплопроводности при $T = 20^\circ C$ изменяется в пределах 24–28 Вт/(м·К). Шероховатость поверхности из спечённых подложек соответствует 6 классу, что явно не приемлемо для нанесения на такую поверхность резистивного покрытия. Чтобы повысить класс шероховатости поверхности, подложек было предложено наносить на её слой глазури толщиной порядка 100–120 мкм. В результате такой операции удалось увеличить класс шероховатости до 10. Разработанные резистивные покрытия состава 80%Cr+20%Ni были нанесены на глазурованные пластинки размером 60x20x2 мм и на ситалловые пластинки такого же размера, но имевшие полированную поверхность. Как следует из результатов исследований R и α покрытий, нанесенных на оба вида подложек, отличия в величинах не наблюдаются. Исходя из этого был сделан вывод, что разработанное резистивное покрытие 80Cr+20Ni, и высокотеплопроводная керамика подходят для изготовления резистивных нагревателей.

Была изготовлена опытная партия (5 штук) резистивных нагревателей на высокотеплопроводных керамических пластинах размером 60x24x2 мм, которые прошли опытно-промышленные

испытания при обогреве ЖК-матриц системы авионики в течение около 1000 часов. После проведения испытаний нагреватели были осмотрены и их параметры протестированы. Практически никаких значимых отклонений параметров и характеристик нагревателя от первоначальных не выявлены.

Заключение

Резистивное покрытие состава 80Cr+20Ni с поверхностным сопротивлением R около 340 Ом/квадрат и термическим коэффициентом сопротивления α меньшим $1 \cdot 10^{-4}$ 1/К может использоваться как нагревательные элементы резистивного нагревателя на высокотеплопроводной керамической подложке. В качестве высокотеплопроводной керамической подложки можно использовать керамику, полученную прессованием промышленного порошка электрокорунда марки 25А зернистостью М1, легированного TiO_2 и ZnO , имеющей коэффициент теплопроводности выше 24 Вт/(м·К).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Материалы в приборостроении и автоматике: Справочник / под ред. Ю.М. Пятин. – М.: Машиностроение, 1982. – 528 с.
2. Колпаков, А.П. Skin-технология. Силовая электроника завтрашнего дня / А.П. Колпаков // Силовая электроника. – 2013. – №1. – С. 24–28.
3. Резников, С.Б. Силовые полупроводниковые ключи для импульсных преобразователей электроэнергии с модульной масштабируемой архитектурой / С.Б. Резников, С.И. Вольский, Ю.Д. Вышков // Электротехника. – 2019. – №2. – С.10–17.
4. Лукин, Е.С. Особенности выбора добавок в технологии корундовой керамики с пониженной температурой спекания / Е.С. Лукин // Огнеупоры и техническая керамика. – 1999. – №9. – С.10–12.
5. Лукин, Е.С. Прочная корундовая керамика с пониженной температурой испытания / Е.С. Лукин // Огнеупоры и техническая керамика. – 1996. – № 10. – С. 2–5.

Статья поступила в редакцию
26.09.2019

ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 16.454.2+159.923.2

М. ПЕТРОВСКАЯ, А. СТОЛЯРОВ, Д. МЯГКОВ

ПСИХОЛОГО-ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ ВОЕННОГО АВИАЦИОННОГО СПЕЦИАЛИСТА

Мария Владимировна Петровская – кандидат психологических наук, профессор кафедры военно-политической работы ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Российская Федерация
mariana_g@mail.ru

Алексей Викторович Столяров – кандидат педагогических наук, доцент кафедры управления повседневной деятельностью подразделений ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского Ю.А.Гагарина», Российская Федерация
stolya-aleksei@mail.ru

Дмитрий Юрьевич Мягков – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры средств наземного обеспечения полетов военного факультета учреждения образования БГАА, Республика Беларусь
myagkovs6993@mail.ru

Аннотация. В представленной статье рассматриваются различные взгляды на проблему создания системы профессиональной подготовки военного авиационного специалиста, развития его способностей квалифицированно решать сложные боевые, инженерные и психолого-педагогические задачи в войсках, приводятся результаты собственных исследований.

Ключевые слова: профессионализм, военный профессионализм, профессиональная подготовка, военные авиационные специалисты.

Истоки понимания профессионализма уходят в древнюю философию, к идеям мыслителей о предназначении человека в мире. Но научные основы изучения профессионализма правомерно связываются с устойчивой традицией, заложенной К. Марксом, Э. Дюркгеймом и М. Вебером в их теории профессиональной деятельности, где она представлена как важнейший вид деятельности человека, обусловленный общественным разделением труда, непосредственно детерминирующим появление новых профессий, а вместе с этим потребность в специалистах, имеющих необходимые профессиональные умения и навыки. На сегодняшний день теория и практика профессионализма изучаются в самых различных направлениях, содержание и сущность которых определяются теоретико-методологической базой исследований.

Так, В.Я. Кикоть рассматривает профессионализм достаточно, на наш взгляд, узко, определяя

его как реализованную форму профессиональных требований, предполагающих определенный уровень подготовки специалиста и сформулированных в общем виде в образовательном стандарте, а в более конкретной форме – в модели специалиста или его квалификационной характеристике [8].

Социально-философские взгляды на данный феномен мы видим в исследованиях Е.Н. Мироновой. В профессионализме, по мнению автора, проявляется совокупность мотивированных установок субъекта труда на профессиональную деятельность и ее результаты в соответствии с общественными ожиданиями. На общественном уровне в профессионализме выражаются отношение социума к профессиональной деятельности и профессионалам, состояние и направленность профессиональной подготовки кадров. На личностном уровне профессионализм отражается в качестве технологической под-

готовки специалиста, характере и степени его мотивации к осуществлению профессиональной деятельности, в содержании и направленности его ориентаций на профессию, способы, средства и цели общественного самодовольствия и самореализации [10].

Большой вклад в развитие понятия профессионализма с акмеологических позиций внес А.А. Деркач, определивший его как качественную характеристику субъекта труда, отражающую высокий уровень профессионально важных и личностно-деловых качеств, акмеологических инвариантов профессионализма, высокий уровень креативности, адекватный уровень притязаний, мотивационную сферу и ценностные ориентации, направленные на прогрессивное развитие специалиста [5].

Следует отметить, что активная и напряженная военно-политическая обстановка последних лет в мире способствовала росту

интереса к проблеме профессионализма военных специалистов. Однако, несмотря на широкий спектр исследований в области профессионализации военной деятельности, разработка данной проблемы остается весьма актуальной и требующей дальнейшего изучения и развития [6]. Для человека, выбравшего в качестве жизненного ориентира служение Отечеству, одним из принципиальных вопросов становится самосознание и самореализация себя как военного профессионала. Здесь без достаточного научного представления о профессионализме не обойтись.

Несколько «жестким» представляется подход вице-президента Коллегии военных экспертов А.И. Владимирова к пониманию военного профессионализма. Рассуждая о военном профессионале, автор называет его специалистом по управлению насилием [2], что на наш взгляд не совсем корректно и оправданно.

Интересный взгляд на офицеров, составляющих армейскую элиту, как представителей военных профессионалов, высказывает М. Янович, выделяя три типа офицеров. Офицеры-герои являются олицетворением воинских традиций мужества и отваги, они поддерживают боевой дух армии и осуществляют преемственность поколений. Офицеры-менеджеры заняты более конкретными, практическими сторонами организации военного дела. Офицеры-технолози несут в армию идеи научно-технического прогресса и обслуживают сложную военную авиационную технику [цит. по 7].

Целый ряд специалистов подходит к пониманию военного профессионализма как интегративного феномена. Так, А.С. Марков определяет военный профессионализм как интегральную индивидуально-личностную психологическую характеристику специалиста, которая включает в себя комплекс профессионализма личности офицера и профессионализм командира [9].

Социально-философское определение военному профессионализму дает В.Н. Гришай, рассматривая его как «целостное интегральное образование «че-

ловеческого материала» (диалектическое единство внутреннего и внешнего, объективного и субъективного), позволяющего личности осуществлять обязанности в соответствии с изменяющимися условиями, статикой и динамикой воинской деятельности по всему спектру субъект-объектного взаимодействия» [4].

Обобщающее определение военного профессионализма представлено у О.Ю. Ефремова и П.А. Корчемного, который авторы характеризуют как «интегративное качество военнослужащих, представляющее совокупность профессионально важных качеств, способность и готовность решать профессиональные проблемы и задачи, возникающие в реальных ситуациях воинской деятельности, с использованием знаний, навыков, умений, профессионального и жизненного опыта, ценностей и культуры» [3].

Однако, на наш взгляд, указанные определения всё-таки являются достаточно общими, своего рода инвариантами общего профессионализма. С целью уточнения специфических признаков военного профессионализма на базе авиационных вузов силовых ведомств, был проведен опрос профессорско-преподавательского, научного и командного состава. Выборка составила 327 человек. Наиболее распространёнными ответами на вопрос «Что такое военный профессионализм?» явились следующие:

- уровень знаний в профессии;
- способность и готовность защищать Отечество;
- преданность идеалам и полная самоотдача Вооруженным силам;
- самоотдача традициям и устоям вооруженных сил;
- совокупность качеств, определяющих военного патриота;
- наличие высшего военного образования;
- совокупность умений и навыков, помогающих военнослужащему в осуществлении повседневной и боевой службы;
- доскональное знание и умение выполнять свои воинские обязанности по предназначению;
- готовность и способность выполнять любые поставленные задачи;

- характеристика, позволяющая достигать высоких количественных и качественных результатов при минимальных затратах;
- умение оценивать на основе опыта и знаний обстановку и своевременно принимать решение;
- способность принимать решения в конкретной ситуации и организовывать личный состав на выполнение задачи;
- высокий уровень подготовки военнослужащего к безупречному и точному выполнению своих профессиональных обязанностей и задач в мирное и военное время;
- интегрированное качество военнослужащего, представляющее совокупность профессионально значимых качеств и готовность выполнять задачи по предназначению;
- высокий уровень навыков, основанных на глубоком знании причинно-следственных связей в организации и ведении военных действий;
- особое свойство военнослужащего, которое подразумевает систематическое, эффективное и надежное выполнение сложной (профессиональной, боевой) деятельности в ходе подготовки и ведения военных действий;
- ответственность военнослужащего за применение своего мастерства перед государством и обществом.

Системно-структурный подход позволяет представить профессионализм в виде совокупности взаимосвязанных и взаимообусловленных структурно-функциональных компонентов, представляющих собой единое целое, направленных на достижение искомой цели. Системно-структурный подход ориентирован на выявление профессионально значимых компетенций военного специалиста в составе профессиональной и психогаммы (Э.Ф. Зеер, Б.Ф. Ломов, Ю.П. Поваренков, В.Д. Шадриков и др.) и является основанием представления военного профессионализма как целостной саморегулируемой системы, которая взаимодействует с другими системами и испытывает на

себе их влияние; имеет уровневое строение, в рамках которого обеспечивается функционирование целого и переход всей системы в оптимальное состояние.

Аксиологический подход в изучении профессионализма направлен на анализ ценностной, смысловой основы его содержания — общечеловеческих, личностных и профессиональных ценностных ориентаций (Л.В. Баева, Е.В. Бондаревская, И.Ф. Исаев, А.М. Новиков, Н.Л. Худякова, О.Е. Шафранова и др.). Как указывает О.Е. Шафранова, в контексте аксиологического подхода становление профессионала понимается как форма профессионализации человека, обеспечивающая возможность ценностно-сообразного конструирования профессиональной картины мира, системы образов «Я-профессиональное» и образов желаемых отношений с собой, миром и другими людьми посредством отношений четырех типов («человек — мир природы и культуры», «человек — его Я», «человек — человек», «человек — род») [11].

Личностный подход утверждает представления о социальной, деятельной и творческой сущности личности. Признание личности как продукта общественно-исторического развития и носителя культуры не допускает сведения личности к натуре человека, а тем самым к вещи среди вещей. Несомненно, что одним из основных критериев профессионализма военного авиационного специалиста является развитость, зрелость его личности. Исходя из личностного подхода, можно предположить, что психический облик личности военного специалиста складывается из коммуникативной, деловой и личностной направленности, организаторских, командных, исследовательских способностей, сильного характера, а также профессионального самосознания, профессиональной и личностной перспективы.

Деятельностный подход в изучении военного профессионализма имеет методологической основой иерархию диспозиционных образований, где первый уровень означает регуляцию непосредственных реакций субъекта

на актуальную предметную ситуацию (поведенческий акт), второй уровень регулирует поступок личности, осуществляемый в привычных ситуациях, третий уровень регулирует уже некоторые системы поступков или то, что можно назвать поведением, наконец, четвертый уровень регулирует целостность поведения, или собственно деятельность. Целеполагание на этом высшем уровне представляет собой некий «жизненный план», важнейшим элементом которого выступают жизненные цели, связанные с главными социальными сферами деятельности человека — в области познания, труда и общественной жизни.

Акмеологический подход к изучению профессионализма (К.А. Абульханова, Б.Г. Ананьев, А.А. Бодалев, А.А. Деркач, Н.В. Кузьмина, А.К. Маркова) позволяет определить пути достижения «акме» в профессии, предполагает выявление условий мобилизации у человека установки на наивысшие достижения, на наиболее полную самореализацию его личности. Акмеологический подход определяется использованием общеметодологических подходов, общеметодологических принципов, а также специальных, более конкретных методологических принципов и представляет собой обобщающий метод, позволяющий решать задачи развития профессионализма личности и деятельности и по своему содержанию являющийся развитием профессиографического подхода [1].

Использование акмеологического подхода применительно к изучению и развитию профессионализма позволяет, прежде всего, рассматривать военного специалиста как совокупное динамично изменяющееся единство характеристик индивида, индивидуальности, личности, субъекта труда, управленца, педагога и т.п., изучать акмеологические закономерности и детерминанты развития профессионализма, выявлять законы, определяющие развитие личности военного авиационного специалиста.

Таким образом, анализ основных положений рассмотренных методологических подходов позволяет определить своеобразие

и несводимость профессионализма ни к одному из них, обнаруживает его многомерный характер, проявляющийся в многогранности, многоуровневости, многообусловленности, который отражает не статичный, а динамичный характер этого явления, проявляющийся в постоянном движении, изменении, преобразовании компонентов, составляющих его целостность и порождающих каждый раз новый, качественно иной уровень организации основания профессионализма — уровень владения профессиональной деятельностью.

Обобщение различных определений, взглядов и подходов позволяет выделить в структуре военного профессионализма ряд компонентов, каждый из которых, органично переплетаясь и взаимодействуя с другими, определяет тенденции и динамику становления и развития военного авиационного специалиста.

Аксиологический компонент через систему ценностных ориентаций определяет духовную готовность к служению Отчизне, своему народу, выполнение военно-патриотического долга, отношение к общественному и воинскому долгу, а также убежденность в высокой социальной значимости воинского труда.

Нормативно-правовой компонент характеризует правовое сознание и правовую практику военного специалиста, основанные на признании и осознании социальной справедливости, целесообразности правовых границ, определяемых нормативно-правовыми актами органов военного управления, выполнении мероприятий по профилактике и предотвращению коррупционных проявлений в Вооруженных Силах.

Служебно-этический компонент отражает нравственно-статусные связи и отношения военного специалиста к выполнению своих должностных обязанностей по предназначению.

Личностный компонент раскрывает особенности формирования, развития и совершенствования военно-профессиональных потребностей, мотивов и мотивации, а также идеалов, целей, сознания, подсознания, эмоций,

воли, которые вместе образуют единство, создают стройную систему и, в конце концов, лежат в основе целостной системы личности военного авиационного специалиста.

Валеологический компонент военного профессионализма отражает возможности сохранять высокую работоспособность, психическое, психологическое и физическое здоровья в условиях выполнения задач, связанных с дефицитом времени, ограниченностью ресурсов, риском для жизни, повышенной ответственностью и т.п.

Содержание *деятельностного компонента* определяется

содержанием воинского труда и отражает способность военного специалиста успешно выполнять гностические, аналитико-прогностические, проектировочно-конструкторские, деятельностно-коммуникативные и оценочно-корректировочные действия.

Акмеологический компонент раскрывает возможности и способности военного специалиста на выполнение всех функций военно-профессиональной деятельности наиболее продуктивным вариантом, используя различные инициативные и креативные аспекты самореализации.

В заключение следует отме-

тить, что проблема становления военного профессионализма многогранна как в содержательном, так и в функциональном аспектах. Ее решение может развиваться в ряде направлений, связанных с совершенствованием военно-профессиональной подготовки на различных уровнях, оптимизацией критериев отбора на занимаемые должности, формированием престижа военной службы и имиджа военного специалиста, расширением целеполагаемого и педагогически организованного взаимодействия военных и гражданских специалистов и др.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Акмеология: учеб. пособие / А. Деркач, В. Зазыкин. — СПб.: Питер, 2003. — 256 с.
2. Владимиров А.И. Внутренние константы военной реформы [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: www.kadet.ru/lichno/vlad_v/VnKonstVoenReform.html. - Дата доступа: 25.01.17 г.
3. Военная педагогика / под общ. ред. О.Ю. Ефремова. — СПб., 2008. — 437 с.
4. Гришай, В.Н. Социология военного профессионализма в современной российской армии: дисс. докт. социол. наук / В.Н. Гришай. — Ставрополь, 2002. — 302 с.
5. Деркач, А.А. Акмеологические основы развития профессионала / А.А. Деркач. — М.: изд-во Московского психолого-социального института; Воронеж: НПО «МОДЭК», 2004. — 752 с.
6. Диденко, И.В. Современный профессионализм: социально-психологический аспект / И.В. Диденко, А.А. Диденко // Психопедагогика в правоохранительных органах. — 2014. — №2(57). — С.3-8.
7. Карлова, Е.Н. Исторический опыт американской военной социологии / Е.Н. Карлова // Социологические исследования. — 2014. — №4. — С. 89-96.
8. Кикоть, В.Я. Система научного обеспечения профессиональной подготовки слушателей вузов МВД России: дисс. докт. пед. наук / В.Я. Кикоть. — СПб., 1998. — 410 с.
9. Марков, А.С. Формирование профессионализма как качества личности специалиста: дисс. ... канд. психол. наук / Е.Н. Марков. — М., 2002. — 182 с.
10. Миронова, Е.Н. Духовные императивы профессионализма и особенно-сти их реализации в подготовке педагогических кадров в условиях модернизации современного образования (социально-философский анализ): автореф. дисс. ... канд. философ. наук / Е.Н. Миронова. — М., 2009. — 27 с.
11. Шафранова, О.Е. Непрерывное образование преподавателя высшей школы — основа оптимизации его профессионального развития: аксиологический подход: автореф. дисс. докт. пед. наук / О.Е. Шафранова. — Владивосток, 2012. — 42 с.

Статья поступила в редакцию
01.11.2019

УДК 372.881.111.1

E. SAMORODOVA, I. BELYAEVA, A. SHEGIDEVICH

IMPORTANCE OF FOREIGN LANGUAGE COMMUNICATIVE COMPETENCE FORMATION OF INTERNATIONAL CIVIL AVIATION FLIGHT PERSONNEL AS AVIATION SAFETY FACTOR

Ekaterina A. Samorodova – PhD in law, Assistant Professor of Department of French Language, Federal state autonomous institution of higher education «Moscow State Institute of International Relations (University) of the Ministry of Foreign Affairs Russian Federation», Russian Federation
samorodova.ekaterina.78@mail.ru

Irina G. Belyaeva – PhD in Philology, Senior Lecturer of Department of German Language, Federal state autonomous institution of higher education «Moscow State Institute of International Relations (University) of the Ministry of Foreign Affairs Russian Federation», Russian Federation
irinatimakova@mail.ru

Artem A. Shegidevich – PhD in Engineering sciences, Rector educational institution BSAA, Republic of Belarus
sart.87@mail.ru

Annotation. This paper authors analyze the foreign language communicative competence role in international civil aviation flight personnel in order to form professional skills. Also, the authors give a characteristic of pilots' foreign language qualification levels according to international rules. This article is also determined to the language competence place in the qualification system for civil aviation pilots and establish different requirements for pilot's foreign language qualification on international and domestic flights. The professional foreign language competence is presented as an interrelation of pragmatic and lexical-grammatical levels and the authors of the recent research propose some activities and training exercises in order to help pilots to overcome lexical and grammatical difficulties while working with foreign language professional text. The teaching foreign professional language methods as case -method, CLIL, role play etc are described in the article as the most convenient for the development of professional foreign language discourse and implementation of professional activities.

Key words: flight personnel, foreign language competence, professional education, radio exchange, audio text, auditory information sources, international civil aviation.

The air transport safety or aviation safety is the most important international air law key principle and one of the biggest and most serious world cooperation goals between states regarding international civil aviation development.

Flight safety ensuring is a harmonious and efficient combination of measures and state actions being legal, aeronautical, technical, organizational and informational by nature, and the

main flight safety purpose is to perform safe international and domestic civil aircrafts flights without any threat to human life and health. In the context of international law, these measures are ensured by relevant recent bilateral and multilateral treaties implementation concluded between states, which include provisions on mutual rights and obligations to cooperate, develop and maintain an appropriate flights safety level, as well as on the suppression or

resolution of situations related to unlawful acts or threats of civil aviation safety.

The Chicago Convention of 1944 has aimed to create appropriate conditions for international civil aviation that will allow it to be developed in a "safe and orderly manner" [1]. ICAO stated similar goals and objectives and indicated them in Art. 44 of the Chicago Convention of 1944: meeting the needs of the peoples of the world for safe, regular, efficient and

economical air transport; safety promotion [1].

The unified technical aeronautical and legal rules creation remains the most important task for contemporary international air law, as a condition to ensure such safety.

The ICAO responsibility includes also development and adoption of new legal and technical regulations regarding aircrafts, as well as their certification and airworthiness, flight personnel and air navigation services.

An indisputable guarantee of efficient and safe air transportation is a competent, highly qualified and trained technical and flight personnel: pilots, flight attendants, flight engineers, air traffic controllers. The ship's commander, being the legal representative of the air carrier's company and possessing company powers, is responsible for the aircraft, passengers and other crew members safety.

A flight engineer as an extra-responsible position in the crew during long-haul flights has for a duty to control the state of aircraft mechanisms and equipment despite the fact that many functions of a flight engineer are automated in new generation aircraft.

The passenger's safety and comfort, and compliance with them composing the necessary safety rules is a part of the flight attendants' task. In case of sudden unforeseen cases, such as fire, turbulence, aircraft decompression, flight attendants are also responsible for organizing and application of necessary measures in order to ensure safe passengers evacuation.

It is impossible to deny that the role of the person on board is primary, so one of the most important task is also to minimize human errors, which are often reasons of tragic consequences. A qualified personnel training, as well as the procedure for issuing certificates of appropriate qualifications for flight personnel, is a direct condition for the international air transport development and the necessary atmosphere of trusting relations between states establishment regarding international air transport cooperation. One of the main tasks of ICAO is to create uniform requirements for issuing certificates that would correspond to modern realities.

Foreign language communication training is also one of the most important condition of flight personnel professional competence formation.

The most important element of flight personnel professional activity is the ability to negotiate in a foreign language with ground-based services and systems.

The constant aircraft's crew communication with the air traffic, aerodrome and meteorological services, control authorities and dispatchers implies a foreign language communicative competence. The ability to understand specialized professional terminology, the ability to conduct a dialogue, and quickly respond to changes in the situation caused by certain circumstances requires special training in order to build the communicative competence of the flight personnel in the terms of foreign language communication. Flight safety **directly depends on how accurately the information is understood and accepted by the crew.**

The basic requirements for foreign language proficiency for pilots are specified in Appendix 1 to the Chicago Convention of 1944: they demonstrate the ability to speak the language used in radiotelephone communications and understand it at 4,5,6 levels [2]. According to the provisions of attachment 1 of Appendix 1 of Annex 1 to Chicago Convention "ICAO languages proficiency rating" [2], the flight personnel linguistic knowledge is evaluated in accordance with six levels. The required language levels are 4,5,6 [2].

A candidate who masters level 4 has a good pronunciation. Phonetic feature and intonation only in some cases impact understanding. There are no serious mistakes in grammatical constructions. There are no serious mistakes in basic grammatical constructions either and if there are some, they do not affect the meaning. The candidate's vocabulary is sufficient for an effective communication on general, specific and work-related topics. He is also capable to keep up the conversation at a proper pace. Fluency of speech can be violated during the transition from the use of standard turns

or learned language stamps to a relaxed exchange. «Filler words» do not interfere with understanding. Regarding the comprehension – the candidate understands general, specific and work-related topics that sometimes require clarification. He responds, as a rule, immediately, appropriately and informatively. Also, the candidate can initiate and support the information exchange. He corrects apparent misunderstandings through verification, confirmation or clarification.

A candidate who has level 5 of foreign language competence according to the Annex 1 to Chicago Convention masters a good pronunciation and intonation that never interfere with understanding. He respects the grammar rules and never does any mistakes, but his attempts to use complex constructions with mistakes sometimes distort the meaning. The candidate uses a sufficient vocabulary in order to communicate effectively on general, specific and work-related topics. Paraphrases are used with confidence, the vocabulary is sometimes idiomatic.

As far as for comprehension the candidate demonstrates a total knowledge of general, specific and work-related topics and an almost complete understanding of non-standard situations and dialects. In dialogues he reacts promptly, appropriately and informatively. Effectively supports the dialogue "speaker - listener".

The most important level of foreign language proficiency according to the Chicago Convention norms is the level 6. The candidate has perfect pronunciation and intonation. He uses successfully basic and complex grammatical structures and sentence patterns and never makes a mistake. The vocabulary variety and clear understanding of professional context allow to create fluent and efficient professional communication.

It should be noted that the requirements for the 5 th level of grammar knowledge allow some distortion of meaning, which is not acceptable from the point of view of flight safety. In this regard, the need to use complex grammatical constructions by pilots that distort

the meaning should be reviewed.

In order to form a foreign language communicative competence of the flight personnel of international civil aviation, it is necessary to take into account its objective and subjective features [3]. Objective features include [3]:

- *Special — profession features, which assume and determine the presence of future experts special professional knowledge and qualities; the use of certain methods;*
- *Organizational — educational process features; the using appropriate material and technical means;*
- *Subjective features can be considered as communicative and cognitive abilities of the learner, his knowledge about the world, his social values etc.*

The formation of foreign language communicative competence as a subject of research is presented in the researches and scientific works [4-13]. Nevertheless, despite a significant number of works, this subject presents a great interest for studying from the contextual approach perspective to learning [3], [14-16], [17].

Among the 16 civil aviation pilots competencies, the first place is given to knowledge of the English language [14]. At the same time, foreign-language competence is an integral part of such competence as the flight safety organization and control, and one of the conditions of it is a competent pilots interaction with dispatchers and ability to work with machinery equipment on a foreign aircraft.

Communication in English carried out by pilots making international flights, involves a foreign language special communication on professional field. For pilots flying within Russia (or other country, domestic flight) English language knowledge is also important in order to understand the operating instructions. Thus, the requirements for foreign competence among pilots of international and domestic flights are significantly different. For international flights pilots, as it has been already mentioned in present article, foreign language competence implies not only passive knowledge of a foreign

language, which consists only of understanding a highly specialized foreign language technical text, but also the ability to communicate via radio in English. A feature of this verbal interaction is the predominance of verbal communication over non-verbal communication and the inability to follow non-verbal signals of the interlocutor - his facial expressions and gestures, which always facilitates understanding. Thus, the leading foreign language skills necessary for working with additive information sources — are listening skills and phonetic competence.

The most important tasks for international flights pilots is the ability to perceive hearing messages of radio exchange at a pace and volume generally accepted for them, to interpret it as accurately as possible regarding the correspondent intent, and also to create an appropriate situation for radio communications.

The main difficulties in the radio communication implementation, pilots may encounter when performing international flights, can be divided into three groups:

- 1) technical;
- 2) speech;
- 3) linguistic.

All of them can serve as an obstacle to the perception and creation of the radio message.

Noise and all kind of interference are technically caused obstacles to an adequate radio message perception, and consequently a speech reaction to it. The following exercises contribute to the pilots preparation for the radio exchange implementation in conditions far from ideal:

- *training audio texts containing artificially created noise, interference, recording defects;*
- *real audio recordings of radio exchanges containing natural interference, noise, defects.*

The individual pilots speech and behavioral characteristics, as well as the linguistic interference resulting from the communication of non-native speakers, are the cause of an inaccurate or wrong radio message interpretation. So to overcome the difficulties of perceiving the English language it's necessary to select audio texts containing speech of both sexes

speakers, different age groups and people from different countries, as well as people with special diction, speaking at a different pace. Such type of activities helping to train an audio text complete understanding, it's suitable to propose to learners self-scripting, then reading them with speakers at a certain pace.

Linguistic difficulties include the lexical and grammatical special language peculiarities. To overcome the radio messages perceiving difficulties, it is necessary to pay attention to the following activities:

- *work with numerals (find, mark, write in the number you heard; write down a number of numbers from memory; find the number that is not in the audio recording; compare the numbers you hear with the written ones and find errors; write down the numbers at a fast pace);*
- *work on the lexical components of audio texts containing homophones, homonyms, paronyms (insert the missing words, complete the sentence to the end, compare the audio text with the script and find errors; compare the audio text with the script and determine the sequence of sentences);*
- *work on the audio texts grammar particularities containing complex verbs, postpositions, denial, gerund, different parts of speech that match in form (determine the time, number of the verb that is denied in the audio text, enter the missing word, match the audio text with the script and correct the errors);*
- *listen to the radio message and select the necessary sequence of actions from the proposed ones corresponding to the audio text;*
- *listen to the message, formulate the sequence of your actions.*

In pedagogical practice with the aim of teaching a foreign language, a wide range of methods is used. But it's to consider that not all existing methods of foreign language teaching are used, as it's shown by the results of the study [18], while teaching a foreign professional language. Regarding objectives of foreign special language teaching for pilots, there could be distinguished the following methods contributing to professional tasks in a foreign development:

- ICT;
- Case study;
- Business game;
- CLIL.

The ICT use means of work based on radio exchanges materials listening and studying.

Case study is a training method aimed at solving a problem by analyzing information, evaluating alternatives in decision making. Students are given a task in English, for the solution of which it is necessary to determine an algorithm of actions by completing the following tasks:

- *distribute the actions required to solve the problem in the required sequence;*
- *select from the indicated action algorithms the most optimal ones for solving this problem;*
- *find a mistake in the given actions algorithm;*
- *create the necessary action algorithm to solve a specific problem.*

Business games promote the foreign language skills training in situations as close as possible to professional activities. Here are pilots professional communication situations in order to obtain

information about:

- *weather;*
- *work of radio equipment;*
- *air conditions to prevent collisions with other aircraft, as well as notifications of search and rescue services.*

All speech situations in which specialists are working each time performing their professional duties can be divided in regular and occasional.

Regular speech situations include:

- *Negotiations with ground services*
- *Aircraft take-off*
- *Captain's address to passengers*
- *A message about the aircraft entering the turbulence zone.*

Among occasional situations one can distinguish:

- *the occurrence of man-made interference on board the aircraft: fire, smoke, depressurization of hatches;*
- *the occurrence of weather conditions that impede take-off or force to urgently land at the airport;*
- *human factor: health problems of the passenger (the plane goes for emergency landing to assist*

the passenger); undisciplined passengers;

- *acts of unlawful interference in the activities of civil aviation.*

The CLIL method allows future pilots to study specialized disciplines in English, which helps to master the terminological base, professional cliches, the ability to formulate, convey, and also understand any problematic situation that occurs when performing professional duties in English.

Overcoming the difficulties is facilitated by the ability of English teachers to access the programs of specialized disciplines departments; the programs for the development, teaching aids for the professional English study with the leading experts participation in the departments of specialized disciplines; analysis of a large number of radio exchanges in order to create, on the basis of this analysis, an educational and methodical complex that takes into account the difficulties of foreign language communication experienced by pilots in everyday professional activities.

REFERENCES

1. Chicago Convention on International Civil Aviation [Electronic resource]. Mode of access: www.icao.int/secretariat/legal/restr/doc10_ru.pdf.

2. ICAO Annex 1 Personnel Licensing [Electronic resource]. Mode of access: <http://cockpitdata.com/Software/ICAO%20Annex%201>

3. Chernyaeva, E.V. Professional-linguistic preparation of flight composition in the system of Qualification and retraining system. Abstract of the dissertation for the degree of candidate of pedagogical sciences. Moscow. – 2011.

4. Zimnyaya, I. A. Key competencies - a new paradigm of the result of education // Higher Education Today. – 2003. – No. 5. – P. 34-42.

5. Iskandarova, O.Yu. Theory and practice of forming a foreign language professional communicative competence of a specialist: Diss... Doct. ped sciences. Orenburg, 2000. – P. 376

6. Makar, L.V. Teaching professionally oriented communication in English to students of a non-linguistic university: Abstract. Dis... Cand. ped sciences. SPb., 2000. – 21s.

7. Byrdina, O. Formation of foreign-language communicative competence of non-philological training profile students by means of Content-based Active Speaking Technology / O. Byrdina, S. Dolzhenko, E. Yurina // Novosibirsk State Pedagogical University Bulletin. – 2018. – Vol. 8, № 4. – P. 7-11

8. Timkina, Yu. Yu. Nonlinear Formation of Foreign Language communicative competence of students under conditions of variative education / Yu. Yu. Timkina // International Scientific Research Journal. – 2017. – No. 11 (65), Part 2. – P. 152-155.

9. Chichilanova, S. A. Formation of foreign language communicative competence of students of a technical university in the process of extracurricular independent work: dissertation ... candidate of pedagogical sciences: 13.00.08 / S. A. Chichilanova, – Chelyabinsk, 2010. – 195 p.

10. Opeshanskaya, I. I. Formation of foreign-language communicative competence of students of a non-linguistic university based on the audio-lingual method: abstract of thesis. ... candidate of pedagogical sciences: 13.00.08 / I. I. Opeshanskaya. – Moscow, 2006. – 23 p.

11. Petrova, G. A. Formation of foreign-language professional and communicative competence of students: abstract of thesis. ... candidate of pedagogical sciences: 13.00.08 / G. A. Petrova. – Novokuznetsk, 2010. – 21 p.

12. Mart, Cagri. From Communicative Competence to Language Development / Mart Cagri // International Journal of English Linguistics. – 2018. – Vol. 8, № 2. – P. 163-167.

13. Celce-Murcia M. Rethinking the Role of Communicative Competence in Language Teaching / M. Celce-Murcia // Intercultural Language Use and Language Learning. – Springer, Dordrecht, 2007. – P. 41-57.

14. Prokhorova, M.V. A holistic model of the competencies of pilots of civil aviation / M.V. Prokhorova, A.L. Larina, N.V. Yamusheva // Psychologist. – 2017. – № 6. – P. 40 - 58.

15. Minakhmetova, G.M. Types of professional competence of the flight attendant / G.M. Minakhmetova // Bulletin of the Russian New University. – 2013. – № 1. – P. 128-131.

16. Starodubtseva, T.A. Essence and specificity of the linguistic competence of cadets of an aviation university / T.A. Starodubtseva // Vestnik SUSU. Series: Linguistics. – 2012. – № 2 (261).
17. Sazanova, T.M. On the concept of multilevel teaching of English in UVAU GA / T.M. Sazanova, L.V. Shavkunova // Training of Civil Aviation Specialists: Sat. scientific tr based on the materials of the inter-university scientific and methodological conference. – Ulyanovsk. 2001. – 34 p.
18. Belyaeva, I.G. Analysis of Innovative Methods 'Effectiveness in Teaching Foreign Languages for Special Purposes Used for the Formation of Future Specialists' Professional Competencies / I.G. Belyaeva, E.A. Samorodova, O.V. Voron, E.S. Zakirova // Educ. Sci. – 2019. – Vol 9 (3). – P. 171-182.

*Статья поступила в редакцию
17.09.2019*



ЮРИДИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 347.82

О. КОЛОШИЧ

Правовое регулирование использования воздушного пространства Республики Беларусь

Ольга Геннадьевна Колошич – магистр наук, ведущий юрист-консульт отдела аэронавигационной информации, РУП «Белэроавиация», Республика Беларусь
olga_K111@list.ru

Аннотация. В статье рассматривается правовое регулирование общественных отношений использования воздушного пространства Республики Беларусь с учетом правовых норм, установленных в международном воздушном праве. Раскрывается национальный аспект ИВП, действующие специально уполномоченные органы, органы Единой системы и иные правовые особенности ИВП Республики Беларусь.

Ключевые слова: международное воздушное право, национальное право, использование воздушного пространства, гражданский и военный сектор, авиационные правила, аэронавигация.

Общественные отношения в области гражданской авиации, в общем, сочетают в себе международный и национальный аспекты. Основным источником международного воздушного права и основополагающим международным договором в области международного правового регулирования использования воздушного пространства (далее — ИВП) является Конвенция о международной гражданской авиации, подписанная в Чикаго 7 декабря 1944 года, ее еще именуют Чикагская конвенция (далее — Чикагская конвенция).

Согласно ст. 37 Чикагской конвенции каждое Договаривающееся государство обязуется сотрудничать в обеспечении максимально достижимой степени единообразия правил, стандартов, процедур и организаций, касающихся воздушных судов, персонала, воздушных трасс и вспомогательных служб, по всем вопросам, в которых такое единообразие будет содействовать аэронавигации и совершенствовать ее. С этой целью Международная организация гражданской авиа-

ции (далее — ИКАО) принимает и по мере необходимости время от времени изменяет международные стандарты, рекомендуемую практику и процедуры, касающиеся вопросов в области гражданской авиации.

Республика Беларусь как страна-участник Чикагской конвенции взяла на себя обязанность стремиться соблюдать положения стандартов и рекомендуемой практики ИКАО. Целью указанных действий является развитие международной гражданской авиации безопасным и упорядоченным образом, установление международных воздушных сообщений на основе равенства возможностей, рационально и экономично.

Вопросы правового регулирования ИВП в целом являются актуальными как в научной, так и в практической области.

В научной доктрине высказываются следующие мнения о соотношении правовых норм, содержащихся в международном воздушном праве, с международным публичным правом. Профессор Ю.Н. Малеев полагает,

что «международное публичное воздушное право производно от международного права. Все тенденции, которые характерны для международного публичного права, вообще прослеживаются и в международном воздушном праве». Основываясь на своих исследованиях, Ю.Н. Малеев отмечает, что «Чикагская конвенция 1944 года нуждается в пересмотре, а международное воздушное публичное право — в унификации» [1]. По его мнению, хорошим примером для унификации публичного права могла бы послужить Конвенция по морскому праву.

Как правильно отмечает молодой ученый, рассматривающий правовые вопросы в области ИВП, Лазар Врбашки, «неотъемлемый международный характер воздушного транспорта обусловил формирование комплексного правового регулирования аэронавигации сначала на международном уровне. Таким образом, в отличие от целого ряда отраслей права, которые формировались сначала на национальном уровне, и лишь затем их отдельные правила закреплялись в междуна-

родных актах, нормы воздушного права сначала были сформированы на международном уровне и только потом внедрены в национальное право» [2, с.49-50].

При рассмотрении вопроса о правовом регулировании ИВП Республики Беларусь, помимо Чикагской конвенции, необходимо учитывать также положения стандартов и рекомендуемой практики Совета ИКАО, в частности, Приложения 4 «Аэронавигационные карты», Приложения № 11 «Обслуживание воздушного движения», Приложение 15 «Службы аэронавигационной информации» к Чикагской конвенции, Дос 8126 «Руководство по службам аэронавигационной информации», Дос 10066 «Управление аэронавигационной информацией».

Так, в Республике Беларусь при формировании национального законодательства должны учитываться и применяться стандарты и рекомендуемая практика ИКАО, они являются основой для установления правовых норм. Данное положение применимо в рамках уже существующей ст. 4 Воздушного кодекса Республики Беларусь (далее — ВК), согласно которой если международным договором Республики Беларусь установлены иные правила, чем те, которые предусмотрены законодательством Республики Беларусь в области ИВП и авиации, то применяются правила международного договора.

Система национального законодательства в области ИВП включает в себя: Конституцию Республики Беларусь, ВК, постановление Совета Министров Республики Беларусь от 4 ноября 2006 г. № 1471 «Об утверждении Правил использования воздушного пространства Республики Беларусь» (далее — Правила ИВП), постановление Совета Министров Республики Беларусь от 23 августа 1999 г. № 1308 «О государственном регулировании и организации использования воздушного пространства Республики Беларусь» (далее — постановление № 1308), постановление Совета Министров Республики Беларусь от 5 декабря 2003 г. № 1593 «О выдаче разрешений на выполнение международных полетов в воздушном пространстве Респу-

блики Беларусь», ряд постановлений республиканских органов государственного управления. К ним относятся:

- постановление Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь от 12 июня 2009 г. № 56 «Об утверждении авиационных правил «Организация воздушного движения»;
- постановление Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь от 2 июня 2010 г. № 44 «Об утверждении авиационных правил «Организация обеспечения аэронавигационной информацией в гражданской авиации Республики Беларусь» (далее — постановление № 44);
- постановление Министерства обороны Республики Беларусь от 27 мая 2014 г. № 20 «Об утверждении Авиационных правил обеспечения аэронавигационной информацией государственной авиации Республики Беларусь». Данные авиационные правила отличаются от международного законодательства, они содержат правила и процедуры, которые были разработаны в СССР и не могут быть применимы к иным пользователям воздушного пространства, кроме государственной авиации;
- постановление Министерства обороны Республики Беларусь от 13 ноября 2017 г. № 21 «Об утверждении Инструкции по использованию воздушного пространства Минского района полетной информации»;
- постановление Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь от 30 июля 2012 № 40 «Об утверждении авиационных правил «Аэронавигационные карты гражданской авиации Республики Беларусь»;
- постановление Министерства обороны Республики Беларусь, Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь от 3 марта 2014 г. № 5/4 «Об утверждении Авиационных правил составления формализованных заявок на использование воз-

душного пространства Республики Беларусь, составления и представления сообщений об использовании воздушного пространства Республики Беларусь»;

- постановление Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь от 19 апреля 2018 г. № 14 «Об утверждении Авиационных правил «Выдача свидетельств и классификация авиационного персонала гражданской авиации Республики Беларусь»;
- постановление Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь от 2 ноября 2010 № 70 «Об утверждении авиационных правил «Профессиональная подготовка авиационного персонала по организации воздушного движения».

ВК устанавливает правовые и организационные основы ИВП Республики Беларусь и осуществления деятельности в области авиации в целях обеспечения потребностей граждан и экономики, обороны и безопасности государства. Как следует из ВК, законодательство в области деятельности гражданской авиации состоит из двух составных неотъемлемых, но все же разных частей: законодательства в области ИВП и законодательства в области авиации. Действие ВК не распространяется на отношения, связанные с использованием гражданами и организациями авиамodelей.

Рассмотрим основы формирования системы национального законодательства в области ИВП.

Согласно статьи 1 ВК под ИВП Республики Беларусь понимаются полеты воздушных судов и иных летательных аппаратов, за исключением авиамodelей, в воздушном пространстве Республики Беларусь, а также деятельность, представляющая угрозу для безопасности этих полетов (проведение стрельб, пусков ракет, взрывных работ, строительство высотных сооружений, деятельность, в процессе которой происходят электромагнитные и другие излучения).

При рассмотрении вопроса о правовом регулировании ИВП необходимо раскрыть вопрос о взаимодействии гражданской и

государственной авиации.

Согласно ст. 3 Чикагской конвенции, она применяется только к гражданским воздушным судам и не применяется к государственными воздушным судам.

При этом в отношении государственных воздушных судов указано следующее: воздушные суда, используемые на военной, таможенной и полицейской службах, рассматриваются как государственные воздушные суда; никакое государственное воздушное судно Договаривающегося государства не производит полета над территорией другого государства и не совершает на ней посадки, кроме как с разрешения, предоставляемого специальным соглашением или иным образом, и в соответствии с его условиями; Договаривающиеся государства при установлении правил для своих государственных воздушных судов обязуются обращать должное внимание на безопасность навигации гражданских воздушных судов.

Таким образом, непосредственно в самой Чикагской конвенции закреплено, что ее правовые нормы распространяют свое действие только на гражданскую авиацию, а авиационные правила государственной авиации должны учитывать безопасность полетов гражданской авиации.

В Республике Беларусь применяются иные правоотношения, отличные от требований Конвенции.

Субъектами государственного регулирования ИВП в Республике Беларусь являются два специально уполномоченных органа по государственному регулированию ИВП Республики Беларусь:

- специально уполномоченный орган в области обороны осуществляет государственное регулирование ИВП Республики Беларусь в целом. Им является Министерство обороны Республики Беларусь (далее — Минобороны);
- специально уполномоченный орган в области гражданской авиации осуществляет государственное регулирование использования части воздушного пространства Республики Беларусь, которая в установленном порядке определена

для воздушных трасс, местных воздушных линий, районов выполнения авиационных работ, аэродромов (вертодромов) гражданской авиации и аэропортов. Им является Министерство транспорта и коммуникаций Республики Беларусь (далее — Минтранс), однако согласно п. 5.29 постановления Совета Министров Республики Беларусь от 31 июля 2006 г. № 985 «Вопросы Министерства транспорта и коммуникаций» непосредственно полномочия специально уполномоченного органа в области гражданской авиации осуществляет Департамент по авиации.

В Республике Беларусь сформирована Единая система организации воздушного движения (далее — Единая система). Организация ИВП Республики Беларусь осуществляется военными и гражданскими органами Единой системы, функционирующими на основе единой нормативной правовой базы и жесткого распределения ответственности между ними. Ответственность за функционирование военных и гражданских органов Единой системы возлагается соответственно на Минобороны и Минтранс.

Единая система имеет стратегическое значение для безопасности государства, ее деятельность не подлежит ограничению или прекращению. Правовой основой взаимодействия гражданского и воздушного сектора является постановление № 1308. Решения органов Единой системы в пределах их компетенции являются обязательными для исполнения государственными органами, органами обслуживания воздушного движения и управления полетами, а также пользователями воздушного пространства Республики Беларусь. При этом, указания военного сектора по вопросам ИВП являются обязательными для гражданского сектора, органов обслуживания воздушного движения и управления полетами, а также пользователей воздушного пространства Республики Беларусь.

Единая система состоит из координирующего, руководящих и оперативных органов.

Координирующим органом Единой системы является Межведомственная комиссия по использованию воздушного пространства Республики Беларусь, создаваемая Советом Министров Республики Беларусь. Цель деятельности координирующего органа является согласование действий заинтересованных государственных органов, органов обслуживания воздушного движения и управления полетами, пользователей воздушного пространства Республики Беларусь по вопросам организации ИВП, функционирования и развития Единой системы.

Руководящие органы Единой системы создаются Минобороны и Минтрансом в целях осуществления исполнительных, разрешительных и контрольных функций по организации ИВП (в пределах своей компетенции), а также обеспечения руководства деятельностью военных и гражданских оперативных органов Единой системы.

Оперативные органы Единой системы создаются Минобороны и Минтрансом в целях планирования и координации ИВП Республики Беларусь, организации воздушного движения, а также контроля за соблюдением порядка ИВП Республики Беларусь, не связанного с проведением проверок и (или) мониторингов.

К оперативным органам Единой системы относятся:

- центр Единой системы, состоящий из военного и гражданского секторов;
 - органы обслуживания воздушного движения на гражданских аэродромах.
- Основными функциями органов Единой системы являются:
- выдача разрешений на использование воздушного пространства, т.е. ИВП Республики Беларусь осуществляется на основании выдаваемого в соответствии с законодательством разрешения соответствующего органа Единой системы (статья 13 ВК);
 - запрещение или ограничение ИВП Республики Беларусь (статья 14 ВК).

Реализация указанной функции вызывает трудности в практическом применении, так как

установление зон закрытых для полетов не позволяет пользователям использовать воздушное пространство, и соответственно вызывает дополнительные расходы, увеличение полетного времени, снижение экономических показателей для государства.

- контроль за соблюдением Правил ИВП, не связанный с проведением проверок (статья 15 ВК);
- принятие предусмотренных законодательством мер по претовращению и прекращению нарушений Правил ИВП.

В международном праве аспекты взаимодействия гражданского и военного секторов определены в Циркуляре ИКАО «Сотрудничество гражданских и военных органов при организации воздушного движения» (Сиг 330) 2011 г., который состоит из следующих разделов: организационные и нормативно-правовые рамки; взаимодействие гражданских и военных органов (эксплуатационная и техническая интероперабельность, нормирование и стандартизация); структуризация и организация воздушного пространства (гибкие и адаптируемые структуры и процедуры использования воздушного пространства); совместное принятие решений; безопасность системы организации воздушного движения и организации воздушного движения в кризисных ситуациях; полеты государственных воздушных судов (неавиационные требования к воздушному пространству в государствах, ограничивающие факторы для государственных воздушных судов, операции на основе полного соблюдения, операции на основе частичного соблюдения); сотрудничество гражданских и военных органов.

Полагаем, с учетом обязательств Республики Беларусь после подписания Конвенции целесообразным будет взять за основу рекомендации ИКАО и примеры успешных практических форм сотрудничества гражданских и военных органов, содержащиеся в указанном Циркуляре ИКАО, адаптировать их с учетом норм национального законодательства.

Как видно из действующей правовой системы гражданский

и военный сектор тесно взаимодействуют друг с другом при правовом регулировании ИВП. Государственный сектор оказывает значительное влияние на правовое регулирование ИВП.

Основным документом, раскрывающим особенности ИВП Республики Беларусь, являются Правила ИВП. Необходимо выделить две составляющие Правил ИВП: порядок организации ИВП Республики Беларусь, а также порядок его использования. При этом, порядок ИВП определяется в интересах граждан и экономики, обороны и безопасности государства.

Л. Врбашки высказывает мнение, что «правовое регулирование аэронавигации преимущественно затрагивает именно государственные интересы. Основными участниками здесь (различные аэронавигационные службы) являются государственными структурами или тесным образом с ними связаны, а регулирование аэронавигации касается воздушного пространства — одно из основных изменений государственной территории и пространственных границ ее суверенитета» [2, с.39].

Порядок организации ИВП включает в себя указание структуры воздушного пространства, границы ее элементов, порядок ИВП в запретных зонах, опасных зонах, зонах ограничения полетов, классификации воздушного пространства на классы С, Е, правила полетов в установленных классах и неклассифицированном воздушном пространстве, предварительное, суточное и текущее планирование и координацию ИВП, обеспечение разрешительного порядка ИВП, организацию воздушного движения, контроль за соблюдением ИВП.

ИВП включает установление интервалов эшелонирования воздушных судов, правила полетов воздушных судов над населенными пунктами, порядок осуществления авиационных работ, выполнения полетов в целях проведения аэрофотосъемки, установление событий, относящихся к нарушению ИВП и иные вопросы.

Как мы видим, перечень нормативных правовых актов, регулирующих общественные отноше-

ния в области ИВП, достаточно широк. Особенность правового регулирования ИВП Республики Беларусь включает обязательное сочетание интересов граждан и экономики, удовлетворение которых возлагается на гражданскую авиацию, и обороны и безопасности государства, которые относятся к компетенции государственной авиации.

Одним из основных видов нормативных правовых актов, регулирующих ИВП, являются авиационные правила, содержащие технологические процедуры и требования как к пользователям воздушного пространства, так и к провайдером аэронавигационных услуг.

В соответствии со статьей 1 ВК одним из видов аэронавигационного обслуживания является предоставление аэронавигационной информации. Согласно статье 16 ВК аэронавигационное обслуживание предоставляется в соответствии с авиационными правилами и иным законодательством, в том числе, международными договорами Республики Беларусь.

Авиационные правила — это обязательные для соблюдения технические нормативные правовые акты, регулирующие деятельность, связанную с ИВП Республики Беларусь, а также деятельность в области авиации.

В части предоставления аэронавигационной информации в гражданской авиации в Республике Беларусь действует постановление № 44, которое определяет организацию обеспечения ИВП Республики Беларусь аэронавигационной информацией, задачи и функции органов аэронавигационной информации гражданской авиации, требования к аэронавигационной информации, порядок создания базы аэронавигационных данных и направлены на обеспечение целостности и качества аэронавигационных данных.

Полагаем, следует отметить принятие нового Закона Республики Беларусь от 17 июля 2018 г. № 130-З «О нормативных правовых актах» (далее — Закон), внесения изменений в статью 6 ВК в части того, что авиационные правила не должны содержать положения, требующие урегулирования на уровне нормативных

правовых актов, не являющихся техническими.

Проанализируем нововведение и возможность его соотнесения с национальным и международным законодательством в области ИВП.

Авиационные правила согласно законодательству относятся к *техническим нормативным правовым актам, не относящиеся к области технического нормирования и стандартизации (далее — ТНПА), предусмотренные пунктом 2 статьи 26 Закона*. Такие ТНПА закрепляют количественные и (или) качественные требования (словесные и (или) цифровые показатели, нормативы, характеристики, правила, методики, классификации, словесные и графические описания) к объектам материального мира, производственным, технологическим и другим аналогичным процессам, классификации технико-экономической и социальной информации, формы предоставления информации, правила, методы и способы поиска, получения, передачи, сбора, обработки, накопления, хранения, распространения и (или) предоставления информации и иные характеристики.

Согласно п. 4 ст. 25 Закона в авиационные правила не включаются требования, которые в соответствии с законодательными актами должны регулироваться нормативными правовыми актами, не являющимися техническими нормативными правовыми актами.

К ТНПА согласно ст. 26 Закона относятся, кроме авиационных правил, геодезические, картографические нормы и правила, зоотехнические, зоогигиенические и ветеринарно-санитарные правила, санитарные нормы и правила, гигиенические нормативы, экологические нормы и правила, классификаторы органов управления, в том числе статистические классификаторы, схемы землеустройства; образовательные стандарты и иные.

В данном случае, законодатель установил равенство между всеми видами ТНПА, а именно авиационные правила приравнял к геодезическим, картографическим нормам и правилам, санитарным нормам и правилам и иным выше-

перечисленным ТНПА. Правила их подготовки и содержания также должны соответствовать Закону.

Установление одинаковых требований ко всем видам ТНПА требует более детального изучения правовой природы возникновения общественных отношений, регулируемых указанными ТНПА.

Общественные отношения в области ИВП, регулируемые авиационными правилами, возникают в результате присоединения Беларуси к Чикагской конвенции. Государство, принимая авиационные правила, должно разрабатывать их во исполнение стандартов и рекомендуемой практики Совета ИКАО. Авиационные правила понимаются как комплексный нормативный правовой акт, регулирующий определенную область общественных отношений в области гражданской авиации, содержащий требования, как технического характера, так и нормативно-правового характера, направленные на обеспечение безопасности полетов, в том числе безопасности аэронавигации.

ИКАО осуществляет контроль за соблюдением государствами требований стандартов. При проведении ИКАО обязательных проверок состояния безопасности полетов, которые затрагивают и безопасность аэронавигации, в рамках Универсальной программы по проведению проверок организации контроля за обеспечением безопасности полетов (УППКВП) проверяет соблюдение государствами семи критических элементов, первым из которых является «*Основное авиационное законодательство*» и его соответствие международным стандартам.

Полагаем, что исключение из авиационных правил положений, требующих урегулирования на уровне нормативных правовых актов, не являющихся техническими, может повлечь за собой существенные отличия от установленных требований ИКАО, может вызвать вопрос о соблюдении ст. 37 Чикагской конвенции.

Внесенные изменения в статью 6 ВК могут повлечь отсутствие возможности соблюдения правовых норм Закона Республики Беларусь от 23 июля 2008

г. № 421-З «О международных договорах Республики Беларусь» (далее — Закон о международных договорах). Статья 17 Закона о международных договорах устанавливает обязательность для Республики Беларусь международного договора, который ей подписан или ратифицирован; статья 36 — международные договоры подлежат добросовестному исполнению Республикой Беларусь в соответствии с международным правом, а нормы права, содержащиеся в международных договорах, подлежат непосредственному применению; статья 37 — при выполнении обязательств по международным договорам руководители государственного органа, департамента государственного органа, к компетенции которых относятся вопросы, содержащиеся в международных договорах, принимают меры для обеспечения исполнения международных договоров.

Таким образом, авиационные правила не могут быть приравнены к иным видам ТНПА, не относящимся к области технического нормирования и стандартизации, так как основаны на установлении и соблюдении международного воздушного права как составляющей части международного публичного права на национальном уровне.

В Республике Беларусь в настоящее время разрабатывается Национальный аэронавигационный план, который предусматривает реализацию мероприятий, определенных Глобальным и Европейским аэронавигационными планами, внедрение стандартов и рекомендуемой практики ИКАО в гражданской авиации Республики Беларусь на период до 2028 года.

Глобальный аэронавигационный план (Дос 9750) был разработан как стратегический документ, призванный регулировать внедрение систем CNS/ATM с учетом Глобальной эксплуатационной концепции организации воздушного движения (Дос 9854) и Стратегических целей ИКАО.

В Национальном АНП могут отражаться меры, направленные на развитие и совершенствование Единой системы и ее объектов, структуры сотрудничества граждан-

ских и военных органов при организации воздушного движения, совершенствование организации воздушного пространства, внедрение динамичного управления воздушным пространством, совместимость и интероперабельность гражданских и военных систем организации воздушного движения.

Одним из основных Приложений, содержащих международные стандарты Совета ИКАО в области ИВП, является Приложение 15 «Службы аэронавигационной информации» к Чикагской конвенции, которое в 2018 году было изложено в новой редакции и установило новые подходы к аэронавигационной информации. В Приложении 15 «Службы аэронавигационной информации» делается уклон на обеспечение качества и целостность аэронавигационной информации, учтены перспективные направления обеспечения аэронавигационной информацией в соответствии с дорожной картой ИКАО.

Основной целью издания данного Приложения является закрепление принципа перехода от концепции установления правил и процедур функционирования и взаимодействия служб аэронавигационной информации к концепции управления аэронавигационной информацией. Под *управлением аэронавигационной информацией* понимается динамичное, комплексное управление аэронавигационной информацией путем предоставления цифровых аэронавигационных данных гарантированного качества и обмена ими в сотрудничестве со всеми сторонами.

Целями перехода являются обеспечение непрерывного усовершенствования системы аэронавигационной информации с точки зрения качества, своевременности и выявления новых видов услуг и информационных продуктов в целях повышения уровня обслуживания авиационных пользователей, внедрения новых информационных продуктов и услуг и усилении акцента на распределении улучшенных данных с точки зрения их качества и своевременности в целях удовлетворения потребностей пользователей и содействия повышению

уровня безопасности полетов, эффективности и экономичности аэронавигационной системы.

Таким образом, можно сформулировать следующие выводы.

1. В Республике Беларусь сформировано законодательство в области ИВП как система нормативных правовых актов, характеризующаяся их внутренней согласованностью, иерархией и обеспечивающая правовое регулирование общественных отношений.

2. Значительное влияние на правовое регулирование ИВП оказывает государственная авиация, так как согласно действующему законодательству существуют два специально уполномоченных органа в области ИВП, сформированы Единая система из гражданского и военного секторов, при выполнении функций Единой системы эти органы осуществляют свои права и обязанности, согласовывая действия друг с другом.

3. Обоснованным является выделение авиационных правил в области гражданской авиации как технических нормативных правовых актов, не относящихся к области технического нормирования и стандартизации, в отдельный вид технического правового акта, который может включать все предписания (технические и нормативные), если они содержатся в положениях стандартов и рекомендуемой практики ИКАО. Это необходимо для должного выполнения обязательств Республики Беларусь, принятых после подписания международного договора.

4. Потребуется корректировка авиационных правил Республики Беларусь, устанавливающих переход от службы аэронавигационной информации к управлению аэронавигационной информацией.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тальцева, Л. Правовые проблемы использования воздушного пространства [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.zakon.ru/blog/2014/6/26/pravovye_problemy_ispolzovaniya_vozdushnogo_prostranstva.
2. Врбашки, Л. Правовое регулирование воздушных перевозок и аэронавигации в ЕС: дисс. ... на соиск. к. ю. н. по спец. : 12.00.10. / Л. Врбашки. — М., 2016. — 203 с.
3. Международное воздушное право и ИКАО / Под ред. О.И. Аксментова; с пред. А.А. Баталова. — СПб.: Институт AERONELP, 2017. — 451 с.

Статья поступила в редакцию
24.10.2019

УДК 347.82

О. КАРПАЧЁВА

ЮРИДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОПЕРАЦИЙ EXCHANGE АВИАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОГО ИМУЩЕСТВА

Оксана Александровна Карпачёва – руководитель юридического отдела АО «Флайттайм», Российская Федерация
Oksana.Karpacheva@flighttime.ru

Аннотация. Оперативный обмен неисправных авиационных компонентов (операции Exchange) – стандартная отраслевая операция и одна из основ системы сервисной поддержки воздушных судов в мировой авиационной практике.

В Российской Федерации и Республике Беларусь операция обмена неисправных авиационных компонентов (операции Exchange) рассматривается налоговыми органами, как последовательная продажа авиакомпанией неисправной авиазапчасти сервисной компании; продажа сервисной компанией исправной авиазапчасти авиакомпании; работы сервисной компании по ремонту неисправной авиазапчасти.

Ввиду экономической нецелесообразности российские и белорусские авиаперевозчики проводят операции обмена неисправных авиационных компонентов (операции Exchange) в США, Китае, странах ЕС, где данная операция стандартная и рассматривается в качестве услуги, указав стоимостью данной услуги пропорционально от затрат на поддержание исправного обменного пула авиазапчастей для обмена. Такое решение вопроса в мировой практике помогает создать некий рынок пулов для оперативного обмена имеющихся у эксплуатантов авиазапчастей.

Создание пула сокращает время простоя авиатранспорта и исключает дополнительные затраты на создание и пополнение собственного склада авиазапчастей, предоставляет авиакомпаниям равные конкурентные преимущества по сравнению с зарубежными партнерами и, что самое важное, повышает контроль за безопасностью полетов, а значит сокращает авиационные происшествия и инциденты. Внедрение операций Exchange на выгодных для их участников условиях внесет внушительный вклад в развитие авиационной отрасли в целом. Как справедливо пишет Майкл Мильде: «Право должно пониматься как динамическая дисциплина, которая меняется вместе с изменяющимися потребностями общества» [1].

Оперативный обмен неисправных авиационных компонентов (операции Exchange) было бы целесообразно (для экономики и авиационного сообщества Российской Федерации и Республики Беларусь) выделить в отдельную сферу деятельности и правового регулирования. В Республике Беларусь и Российской Федерации не развивается привлекательный с финансовой и технологической точки зрения рынок «тяжелого» ремонта авиатехники. Низок спрос на воздушные суда российского производства в связи с несоответствием сервисной поддержки мировым стандартам. В настоящее время налоговые льготы в Российской Федерации и Республике Беларусь для предприятий авиационной отрасли носят в основном инновационно направленный характер, что конечно же недостаточно.

Ключевые слова: авиационный компонент, операция Exchange, налогообложение, юридическое оформление, законодательные акты.

Понятие оперативного обмена авиационных компонентов (exchange)

«На западе существует процедура Exchange – это фактически обмен отказавшего блока на рабочий в очень краткие сроки, чтобы самолет не простаивал. Таким образом, мы меняем один блок на другой с доплатой со стороны авиакомпании, и авиакомпания не ждет пока блок отремонтируется, сразу приступая к полетам» [2].

Главной задачей технической поддержки воздушных судов во всем авиационном мире является процедура оперативной замены неисправного авиационного компонента из обменного пула сервисной компании (можно его обозначать как «Обменный пул/фонд компонентов») на исправный компонент. Поэтому обменные сделки так популярны в мировой практике. Оперативный обмен, в мировой практике обозначенный как операция Exchange, позволяет решить вопрос по срочному ремонту воздушного судна, максимально снизить срок ремонта, минимизировать время простоя ВС, ускорить процесс ремонта воздушного судна, сократить время его простоя, наладить контроль над оборотом компонентов и выработать прозрачность прохождения и нахождения того или иного компонента в Обменном пуле, что напрямую влияет на безопасность полетов и заинтересованность авиакомпаний в проведении ремонтных работ и поддержанию летной годности воздушных судов на сертифицированных российских и белорусских сервисных и ремонтных станциях.

Так как согласно статьи 23 Воздушного кодекса Республики Беларусь: «Требования к летной годности воздушных судов, авиационных двигателей и воздушных винтов устанавливаются авиационными правилами и иными обязательными для соблюдения техническими нормативными правовыми актами и являются обязательными для организаций и граждан, в том числе индивидуальных предпринимателей, участвующих в создании, испытаниях, серийном производстве, приемке, эксплуатации, ремонте, модернизации, переоборудова-

нии и модификации воздушных судов, авиационных двигателей и воздушных винтов и их доработке по бюллетеням разработчика и (или) изготовителя» [3].

Поэтому настоящая статья не будет описывать гарантийные обязательства и техническое состояние принимаемого в обмен вышедшего из строя компонента. Так как это тема для отдельной статьи и она требует особого и пристального внимания.

Мировой авиационный опыт выработал следующую схему оперативной замены авиационных компонентов Exchange:

- а) Эксплантат/авиакомпания сталкивается с необходимостью замены вышедшего из строя авиационного компонента. Обращается к сертифицированному Шопу (ремонтной станции) с запросом по замене;
- б) Шоп (Сервисная/ремонтная станция) предоставляет из своего обменного фонда рабочий компонент;
- в) Шоп, снимает неисправный авиационный компонент и очень быстро устанавливает рабочий, сертифицированный, отвечающий требованиям авиационных властей (EASA FORM 1 в соответствии с требованиями одобренных процедур сервисной станции), авиационный компонент;
- г) Воздушное судно авиакомпании готово к работе, а тем временем неисправный авиационный компонент Шопом отправляется в ремонт.
- д) Шоп проводит ремонт и отремонтированный компонент становится частью обменного фонда и переходит на склад сервисной станции/Шопа до момента, когда поступит новая заявка от авиакомпании.
- е) Шоп формирует счет за услугу операции Exchange (в нее обычно входит: счет ремонт неисправного компонента и счет за аренду исправного компонента. Аренда исправного компонента оговаривается сторонами в количестве дней, если авиакомпания выходит за оговоренное количество дней и не возвращает неисправный блок в указанное время, Шоп выставляет повторный счет

за аренду).

- г) Если ремонт компонента экономически не целесообразен или ремонт не возможен – BER или авиакомпания по какой-то причине не предоставляет сломанный блок – сделка переводится в куплю-продажу по заранее согласованной с авиакомпанией стоимости.

Ценообразование

В зависимости от Шопа, применяются различные варианты ценообразования, есть более простые, есть более сложные. Один из факторов ценообразования будет производиться с учетом технического состояния компонента, ресурсных показателей (ремонт/капитальный ремонт/доработка, техническое обслуживание). Как процент от стоимости рабочего блока или оценочная компенсация затрат на ремонт неисправного блока или полное возмещение понесенных затрат или (в зависимости от степени эксплуатации ВС) привязано к ставке с летного часа.

В любом случае будут учитываться затраты на поддержание обменного фонда компонентов. Это так называемая аренда за пользование исправным компонентом, в зависимости от количества дней или привязывается к летному часу, может включать членский взнос, компенсация расходов на ИТ обслуживание, информирование, классифицировать можно следующим образом:

- Компенсация расходов на формирование обменного фонда;
- Инспекция компонентов на аутентичность, сертификацию/продление летной годности компонента.
- Компенсация затрат на ремонт, сертификацию, поддержание летной годности компонента
- Компенсация административных расходов
- Компенсация расходов по поддержанию достаточного объема оборота обменного фонда

Не смотря на сложность данной сделки, она очень популярна и распространена в мировой практике и экономически целесообразна для всех игроков авиационного рынка. Более того, оперативный обмен авиацион-

ных компонентов (операции Exchange) стимулирует работу сервисных компаний, создание единого обменного фонда компонентов производится системно, что позволяет более тщательно контролировать безопасность полетов и соответствие требованиям сертификации, аутентичности и поддержанию летной годности.

Виды операции Exchange в мировой практике

В зависимости от вида обменного фонда можно разделить обмен авиационных компонентов (Exchange) с реальным обменным фондом — Exchange и операционный Exchange с операционным обменным фондом.

Под реальным обменным фондом понимается — централизованный склад авиационными компонентами, из которого удовлетворяются потребности авиакомпаний с целью Exchange.

Под виртуальным обменным фондом понимается — авиационный компонент не перемещается централизованно на определенный склад, а берется у одного Шопа другим Шопом за арендную плату.

Еще одной квалификацией является:

«В мире распространены три основные схемы организации пулов запасных частей. В первом варианте пул формируется группой перевозчиков с созданием единого склада и общей управляющей структуры. Участники пула инвестируют свои средства в складские запасы и финансируют деятельность управляющей структуры.

Во втором случае перевозчики, формирующие пул, сохраняют собственные склады, но создают единый информационный портал, которому платят отчисления за информационное обеспечение. Запасные части передаются между авиакомпаниями-участниками, на условиях прямой аренды. Третий вариант предполагает наличие независимого оператора, который формирует собственный пул запасных частей и передает их в аренду по запросам авиакомпаний» [4].

Конечно же вид Exchange напрямую влияет на ценообразование.

Возникает вопрос ответствен-

ности, гарантийных обязательств и контроля. Повторюсь, что эта тема для отдельной статьи и в данном контексте мы специально не затрагиваем данные моменты потому, что в рамках одной статьи не сможем полноценно раскрыть столь важную тему.

Проблема применения «операции Exchange» на территории России и Белоруссии

В мировой практике оперативный обмен авиационных компонентов (Exchange) рассматривается как одна услуга. Однако, в Российской Федерации и в Республике Беларусь данная операция классифицируется как две встречные сделки купли-продажи с соответствующими документальными ограничениями и налоговыми последствиями, а последующий ремонт, еще как самостоятельная сделка. Тем самым подталкивая авиакомпанию обращается к иностранным сервисным станциям/Шопам.

Отсутствие в налоговых нормах глубокого регулирования понятия — реализации применительно к обороту авиационных компонентов в рамках сделки Exchange- не позволяет учитывать оказываемые услуги Exchange самостоятельно от движения самих компонентов.

Тогда как в мировой практике Шоп при совершении сделки Exchange в качестве услуги, не сталкивается с документальными ограничениями и оформляет данную сделку, как одну услугу определив ее стоимость как компенсацию своих затрат. Что позволяет уйти от недостоверного ценообразования по цепочке сделок, соответствующих налоговых рисков и как следствие оперативной установки на ВС исправного компонента.

Еще одним негативным моментом отсутствия правового урегулирования оперативного обмена неисправных авиационных компонентов (операции Exchange) является отсутствие формирования данного рынка в целом, что, в свою очередь, препятствует и является недостатком для российских и белорусских производителей авиационной техники, препятствующим созданию со-

временных систем послепродажного обслуживания авиационной техники.

Налогообложение

В связи с тем, что в России и Белоруси данная операция обмена неисправных авиационных компонентов (операции Exchange) классифицируется как встречные сделки купли-продажи и последующий ремонт, еще как самостоятельная сделка.

А в соответствии со статьей 31 Налогового кодекса Республики Беларусь: «Реализацией товаров (работ, услуг), имущественных прав признаются отчуждение товара одним лицом другому лицу (выполнение работ одним лицом для другого лица, оказание услуг одним лицом другому лицу), передача имущественных прав одним лицом другому лицу на возмездной или безвозмездной основе вне зависимости от способа приобретения прав на товары (результаты выполненных работ, оказанных услуг), имущественных прав или формы соответствующих сделок» [5].

В рамках действующего налогового законодательства Республики Беларусь любое отчуждение товара одним лицом другому лицу признается реализацией с соответствующими налоговыми последствиями по начислению НДС, налогу на прибыль и вытекающей из этого достаточно громоздкой и трудоемкой схемой документооборота. Аналогичная ситуация происходит и в России.

Не упрощает задачу квалификация операции обмена неисправных авиационных компонентов (операции Exchange) как мену неравноценных блоков, здесь авиакомпании сталкиваются с невозможностью формирования цены на компонент, снятый с воздушного судна и не отраженный самостоятельно в регистрах бухгалтерского учета. Все время прибегать к экспертной оценке авиакомпании по определению не сможет, это дополнительные расходы и непонятно каким образом квалифицировать потом ремонт вышедшего из строя блока, обосновывать экономическую целесообразность сделки и как принимать потом ее к бухгалтерскому учету.

Трудоёмкая схема документо-

оборота является существенным конкурентным недостатком для российских и белорусских производителей, что препятствует развитию авиастроения в целом наших суверенных держав.

Юридическое оформление «операций Exchange», в какие законодательные акты можно было бы внести изменения

Значительно оптимизировать документооборот операций Exchange можно было бы в рамках изменений положений налогового законодательства.

Например, если бы ункт 2 статьи 31 Налогового кодекса Республики Беларусь дополнить «Передача вышедших из строя частей воздушного судна в рамках выполнения работ по техническому обслуживанию, ремонту, поддержанию летной годности воздушных судов». Это позволило бы сделать исключение операции EXCHANGE из понятия реализации. Тем самым считать ее одной сделкой согласно мировой практике, а не цепочкой последующих реализаций.

Конечно необходимо провести системный анализ права и сравнить последствия варианта оформления, который может стать возможным при принятии предложенных изменений. Уверена, необходим более фундаментальный подход к решению данной правовой задачи. Целью настоящей статьи является в большей мере обозначить проблему и прекрасные возможности оперативного обмена неисправных авиационных компонентов (операции Exchange), который столь популярен на мировом авиационном рынке.

Перспективы реализации операций Exchange на территории Российской Федерации и Республики Беларусь

Опираясь на мировой авиационный опыт, можно предположить, что нормативное урегулирование оперативного обмена авиационных компонентов (Exchange) благотворно скажется на всех игроках авиационного рынка:

- Появится регулируемый, прозрачный, дифференцированный обменный пул растаможенных авиационных компонентов в России и Республике Беларусь, что уменьшит сроки ремонтов и минимизирует ремонты у иностранных Шопов;
- Усилится позиция послепродажного сервиса российских и белорусских производителей, сервисные и ремонтные станции получат дополнительные преференции для развития, что благоприятно скажется на всей авиационной отрасли наших суверенных держав. Упростится задача по созданию конкурентного послепродажного обслуживания, повысится качество обслуживания, что благотворно скажется на безопасности полетов в целом;
- Появление отечественных рынков с централизованными пулами авиационных компонентов значительно увеличит налоговые отчисления в бюджеты наших суверенных держав.

Статья поступила в редакцию
09.10.2019

ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К СТАТЬЯМ ДЛЯ ОПУБЛИКОВАНИЯ

Текст статьи должен быть выполнен на листах формата А4 книжной ориентации. Поля: верхнее, нижнее, левое — 2 см, правое — 1 см. Межстрочный интервал — полуторный, абзацный отступ — 1,25 см; шрифт MS Times New Roman Cyr, 14 pt. Выделения в тексте возможны только полужирным шрифтом и (или) курсивом. Иные стили шрифта и выделения не допускаются. Текст, формулы и таблицы должны быть подготовлены в MS Word.

В левом верхнем углу без абзацного отступа индекс УДК шрифтом 10 pt, под ним название статьи (по центру прописными буквами, 14 pt, жирный шрифт), далее по центру инициалы и фамилии авторов (строчными буквами по центру, 10 pt). Ниже аннотация — краткая характеристика научной статьи, шрифт обычный, 10 pt. (рекомендуемый средний объем 800 знаков с пробелами, но не более 1000 знаков с пробелами). Далее ключевые слова, не менее 8 слов. Основной текст статьи объемом от 10 стр. (через пустую строку после ключевых слов). Выравнивание текста по ширине. Внутренние подзаголовки центрировать. После текста всей статьи необходимо оставить 2 пустые строки.

Далее литература (библиографическое описание — ГОСТ 5.0.7). Заголовок раздела СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ (без точки в конце) набирается заглавными буквами жирным шрифтом размером 10 pt по центру строки (без абзацного отступа). Далее — пустая строка. Список литературы состоит из приставных библио-

графических ссылок и оформляется по ГОСТ 5.0.7. Порядковый номер ссылки указывается в соответствующей строке текста в квадратных скобках. Источники в библиографическом списке располагаются в порядке их упоминания в статье. В статье рекомендуется использовать в среднем 10 литературных источников. Список литературы также оформляется в виде комбинации транслитерации и перевода на английский язык (REFERENCES).

Далее на английском языке: название статьи (заглавные буквы, жирный шрифт, 11 pt); фамилия и инициалы авторов на английском языке (жирный шрифт, 10 pt); аннотация в таком же формате, как и в начале статьи; ключевые слова Keywords: и обычным шрифтом сами слова. После ключевых слов необходимо оставить 2 пустые строки.

На новой строке в центре (без абзацного отступа) пишется заголовок: Сведения об авторах (без точки в конце), затем — пустая строка, а за ней: фамилия, имя и отчество полностью — жирным шрифтом, а далее простым шрифтом: ученые звания (в том числе почетные), ученая степень, должность и место работы, область научных интересов, адрес электронной почты. Далее идет информация об авторах в комбинации транслитерации и английского языка (About the authors): фамилия и инициалы — в транслитерации, должность и название организации, Министерство (ведомство и т.д.) на англ. языке, адрес в транслитерации. В конце приводится e-mail.

Требования к оформлению

таблицы: таблица должна размещаться сразу же после ее первого упоминания в тексте, как правило, в центре строки. Слово таблица и номер — в правом конце строки: Таблица 1 (основным жирным шрифтом, 11 pt), затем ниже идет название таблицы (обычный шрифт, по центру). Ссылки на таблицу в тексте оформляются в следующем виде: табл. 1 — без закрывающей точки. Таблица, с учетом ее размеров, может располагаться как на отдельной странице, так и на странице с альбомной ориентацией.

Для математических выражений и формул следует использовать встроенный редактор формул WORD (Microsoft Equation 3.0.), либо редактор Math Type. Отдельно стоящие формулы следует располагать в центре строки. Если формула нумеруется, то необходимо проставлять ее номер в скобках справа.

Рисунки, иллюстрации и подписи к ним должны быть вставлены в текст статьи в цветном виде, а также прикреплены отдельным файлом любого графического формата. Рисунки нумеруются последовательно и располагаются по центру строки. Начинать их следует с Рис. 1. (курсивным шрифтом). Если рисунок содержит подписную подпись (шрифт 11 pt), то эта подпись не должна быть включена в состав рисунка.

Цитирование в статье должно сопровождаться ссылками в квадратных скобках на источники из списка литературы в конце статьи. В постраничных сносках следует указывать только уточняющую информацию.

РУБРИКИ ЖУРНАЛА

- Технические науки;
- Педагогические науки;
- Юридические науки

Направления:

Многофункциональные летательные авиационные комплексы;
Авионика, силовые установки и конструкции воздушных судов;
Применение информационных технологий в авиации;
Инжиниринг и аддитивные технологии в авиации;
Аэронавигация;
Актуальные вопросы профессионального образования авиационных специалистов;
Авиационная безопасность и безопасность полетов;
Правовые вопросы авиации.

УСЛОВИЯ ОПУБЛИКОВАНИЯ В ЖУРНАЛЕ

Для опубликования статьи в журнале необходимо представить:

1. Экспертное заключение о возможности опубликования в открытых источниках печати (оригинальные экспертные заключения о возможности опубликования в открытых источниках обязательно предоставить в оргкомитет) в электронном виде в формате pdf.
2. Материалы статьи представляются в электронном виде, подготовленные в MS Word, объемом от 10 страниц формата А4, оформленные согласно установленным требованиям.

Материалы присылать по адресу: avia.vestnik@bgaa.by.

В названии файла указывать фамилию автора (либо фамилии соавторов через запятую) в именительном падеже, а также первые два-три слова из названия статьи.

Языки материала статьи: белорусский, русский, английский.

Плата за публикацию не взимается.

Электронная версия депонированного журнала будет опубликована на сайте учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации»:

www.bsaa.by

АДРЕС РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

220096, г. Минск, ул. Уборевича, 77
Учреждение образования «Белорусская государственная академия авиации»
Телефон: +375 (17) 345-32-34
e-mail: avia.vestnik@bgaa.by

*К печати принимаются статьи, отвечающие профилю журнала,
не публиковавшиеся ранее в других отраслевых изданиях.*

*Материалы, оформленные с нарушением требований или не прошедшие рецензирование
(отклонены рецензентом) не публикуются.*