№ 6 ИЮЛЬ 2022
ISSN 2707-6989

БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
АКАДЕМИЯ АВИАЦИИ

Авиационный вестник
The aviation herald

Научно-практический журнал

THE AVIATION HERALD, 2022, no. 6
АВИАЦИОННЫЙ ВЕСТНИК. 2022. № 6

Главный редактор:
А.А. Шегидевич, к.т.н., ректор БГАА, Республика Беларусь
Заместители главного редактора:
Л.И. Гречихин, д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры естественнонаучных и общепрофессиональных дисциплин БГАА, Республика Беларусь
А.П. Кульпанович, к.т.н, доцент, проректор по научной работе БГАА, Республика Беларусь
А.А. Жукова, к.т.н, Республика Беларусь
Технический секретарь:
Е.А. Шапорова, к.х.н., заведующий аспирантурой БГАА, Республика Беларусь
Редколлегия
Технические науки:
С.А. Чижик, академик НАН Беларуси, д.т.н., профессор, первый заместитель Председателя Президиума НАН Беларуси, Республика Беларусь;
А.П. Ласковнёв, академик НАН Беларуси, д.т.н., главный научный сотрудник ФТИ НАН Беларуси, Республика Беларусь;
В.Г. Залесский, д.ф.–м.н., директор ФТИ НАН Беларуси, Республика Беларусь;
А.Т. Волочко, д.т.н., профессор, начальник отдела материаловедения и литейно-деформационных технологий ФТИ НАН Беларуси, Республика Беларусь;
Ю.Ю. Михальчевский, к.т.н., д.э.н., доцент, ректор ФГБОУ ВО СПбГУ ГА, Российская Федерация;
М.М. Хакдод, д.т.н., профессор, член–корреспондент Академии наук Республики Таджикистан, чрезвычайный и Полномочный Посол Республики Таджикистан в Республике Беларусь, государственный советник 1–ой степени, Республика Таджикистан;
А.Х. Гильмутдинов, помощник Президента Республики Татарстан, д.ф–м.н., профессор, заведующий кафедрой лазерных технологий ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ», Российская Федерация;
И.В. Яцкив, д.т.н., профессор, проректор по науке и развитию TSI, Латвийская Республика;
А.Н. Медведев, д.т.н., профессор, профессор кафедры транспорта TSI, Латвийская Республика;,
Ши–Хонг Джанг, д.т.н, профессор, исполнительный секретарь Китайского исследовательского объединения глубокой вытяжки металлов, профессор IMR CAS, Китайская Народная Республика;
Воонг Шин Квак, президент компании SafeUsDrone, Республика Южная Корея;
В.П. Бабак, член–корреспондент НАН Украины, д.т.н., профессор, заместитель директора по научной работе ИТТФ НАН Украины, Украина;
С.Н. Неделько, д.т.н., профессор, начальник ЛА НАУ, Украина.
Юридические науки:
Б.П. Елисеев, д.ю.н., профессор, ректор МГТУ ГА, Российская Федерация;
В.С. Каменков, д.ю.н., профессор, профессор кафедры финансового права и правового регулирования хозяйственной деятельности юридического факультета БГУ, Республика Беларусь;
З.З. Халилов, к.ю.н., доцент кафедры «Правоведение» НАА, Республика Айзербайджан.
Педагогические науки:
А.М. Волочко, к.фил.н., д.пед.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории гуманитарного образования НИО, Республика Беларусь;
Т.В. Казак, д.псх.н., профессор, член–корреспондент Международной академии психологических наук, заведующий кафедрой инженерной психологии и эргономики БГУИР, Республика Беларусь;
В.Г. Стуканов, к.псх.н., д.пед.н., профессор, заведующий лабораторией проблем воспитания личности НИО, Республика Беларусь;
Г.М. Булдык, д.пед.н., профессор, профессор кафедры физических и математических основ информатики Белорусской государственной академии связи, Республика Беларусь.

АВИАЦИОННЫЙ ВЕСТНИК

Научно-практический журнал

СОДЕРЖАНИЕ

АВИАЦИЯ В ЛИЦАХ

Клименко Петр Павлович – первый начальник Минского авиационного технического училища гражданской авиации 4

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Л. Гречихин. Формирование p- и n- проводимости отрицательными ионами 8

И. Аушев, Д. Беляев, Д. Липницкий, И. Шишко, К. Белянко. Технологии виртуальной реальности при проведении технологических практик 17

А. Боровой, А. Маликов, Т. Тищенко. Определение дисперсии ошибок при расчете координат объекта в многопозиционной разностно-дальномерной системе 21

Ю. Гурвич, А. Демко, О. Порожнюк. Многокритериальная идентификация и выбор в теоретической механике 26

В. Тузлуков, В. Красковский. Современные системы сопровождения объектов 43

В. Малеронок, А. Алифанов. Особенности моделирования в среде ANSYS процесса магнитно-импульсной обработки режущего инструмента в авиастроении 51

И. Потапов, А. Косицын, О. Конопелько. Способ расчета температурного поля контейнера съемного оборудования воздушного судна на основе метода конечных элементов 56

А. Шегидевич, З. Машарский. Проявление особенностей человеческого фактора у авиапассажиров при осуществлении полета на воздушном судне 63

А. Санько, А. Шейников. Моделирование ветровых возмущений, действующих на блок чувствительных элементов навигационной системы в вертикальном канале БЛА 68

Е. Шапорова, С. Стойко. Моделирование напряженно-деформированного состояния роликового подшипника авиационного двигателя 77

ЮРИДИЧЕСКИЕ НАУКИ

А. Ерофеев, О. Терещенко, М. Страдомский. Применение международного опыта нормативного правового регулирования в системе обеспечения транспортной безопасности 86

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) 378 94 22, факс (017) 271 66 32
academy@bsaa.by
www.bgaa.by

THE AVIATION HERALD

Scientific and practical journal

CONTENTS

AVIATION IN PERSONS

Klimenko Petr – the first head of the Minsk Aviation Technical School of Civil Aviation 4

TECHNICAL SCIENCES

L. Gretchikhin. Fomation of p- and n- negative ion condactivity 8

I. Aushau, D. Beliayeu, D. Lipnitski, I. Shishko, K. Bialianka. Virtual reality technologies when conducting technological practices 17

A. Baravoi, A. Malikov, T. Tishchenko. Analytical solution of the problem of determining the dispersion of errors in determining object coordinates in a multiple difference-range system 21

Y. Gurvich, A. Demko, O. Porozhniuk. Multi-criteria identification and choice in theoretical mechanics 26

V. Tuzlukov, V. Kraskovsky. Modern objects tracking systems 43

V. Maleronok, A. Alifanov. 3D modeling of the cutting tool processing used in the aircraft manufacturing. Problems of modeling in the ANSYS environment 51

I. Potapov, A. Kositsyn, O. Konopelko. Method for calculating the temperature field of a removable container aircraft equipment based on the finite element method 56

A. Shegidevich, Z. Masharski. Psychological peculiarities of the behaviour of passengers on board the aircraft 63

A. Sanko, A. Sheinikau. Simulation of wind disturbances in acting on the unit of sensitive elements of the navigation UAV vertical channel systems 68

E. Shaporova, S. Stoiko. Simulation of the stress-strain state of the roller bearing of the aviation engine. 77

SCIENCES OF LAW

A. Erofeev, O. Tereshchenko, M. Stradomsky. Application of international experience in legal regulation of the transport security ensuring system 86

Educational establishment
BELARUSIAN STATE ACADEMY OF AVIATION

220096, Minsk, Uborevich St., 77
Tel. +375 (17) 378 94 22, fax (017) 271 66 32
academy@bsaa.by
www.bgaa.by

Колонка главного редактора

Шегидевич Артем Артурович

Ректор Белорусской государственной академии авиации

Беспилотная авиация на сегодня является одним из наиболее перспективных и активно развивающихся направлений авиационной науки и техники! Первые беспилотные летательные аппараты были дорогостоящими, сложными в изготовлении и эксплуатации и применялись в основном в военных целях. Сейчас все в большей степени рассматривается использование беспилотных воздушных судов для гражданских нужд, существенно расширился и модельный ряд в зависимости от их назначения. Появляются образцы аппаратов, способных не только проводить мониторинг каких-либо объектов, но и доставлять грузы. Еще недавно нереальным проектом казался аэромобиль, а сегодня подобные идеи уже воплощаются в жизнь. Создаются принципиально новые беспилотники, у которых нет ограничений, связанных с наличием людей на борту. При этом существующие средства моделирования и проектирования позволят создавать разнообразные типы беспилотных воздушных судов (БВС), персонализированные для конкретных рынков и применений.

В Республике Беларусь также активно ведутся разработки по созданию БВС и нормативно-правового поля для их применения. Мы надеемся, что страницы журнала станут стартовой площадкой для новейших идей и технологий в области беспилотной авиации.

Верстка, дизайн:
О.М. Борздова, магистр технических наук, заместитель начальника пресс-службы – начальник редакционно-издательского сектора учреждения образования БГАА

Клименко Петр Павлович – первый начальник Минского авиационного технического училища гражданской авиации

Петр Павлович Клименко

Традиционно в октябре отмечается День академии — это своего рода день рождения нашего учреждения образования. Ведь именно 1 октября 1974 года берет свое начало Минское авиационное техническое училище гражданской авиации, спустя годы ставшее Белорусской государственной академией авиации.

Неотъемлемая часть нашего настоящего — уважение к прошлому, воспоминания о том, как все начиналось, и о тех, кто стояли у истоков, вносили большой вклад в становление нашего учебного заведения.

Одним из таких людей является Петр Павлович Клименко — первый начальник Минского авиационного технического училища гражданской авиации. Можно сказать — «отец» нашего учреждения образования. Он возглавлял училище на протяжении 7 лет — именно под его руководством оно сформировалось и окрепло.

В этой статье мы поделимся деталями профессиональной и личной жизни Петра Павловича, показывая, каким он был работником, начальником, другом, семьянином и человеком...

Биография

Клименко Петр Павлович родился 14 июня 1927 года в с. Терпение Запорожской области Украины, там же закончил среднюю школу. С 1947 по 1951 год обучался в Киевском институте инженеров гражданской авиации. По окончании института получил специальность «инженер-механик по самолетам и двигателям» и был направлен на работу в Узбекское управление гражданской авиации.

В управлении Петр Павлович проработал с 1951 по 1957 год. За это время прошел трудовой путь от инженера до начальника авиационно-технической базы аэропорта «Ташкент».

С 1957 по 1962 год работал в должности главного инженера авиаремонтного завода № 243 гражданской авиации в Ташкенте, а с 1962 по 1965 год — главным инженером авиаремонтного завода № 407 в Минске.

Петр Павлович был высококвалифицированным авиационным специалистом с большим опытом практической работы на предприятиях — он прошел путь от рядового сотрудника до главного инженера. Однако из-за состояния здоровья Петр Павлович не мог продолжить работу на заводе. Он сменил свой род деятельности, тем не менее оставаясь в гражданской авиации.

С 1965 до конца 1974 года Петр Павлович работал заведующим Минского учебно-консультационного пункта Киевского института гражданской авиации, в который после трех лет обучения приезжали курсанты Киевского института гражданской авиации для продолжения получения образования. Клименко П. П. за короткий срок сделал это учреждение одним из лучших. И в 1968

Петр Павлович с одногруппниками
(на фото – в среднем ряду, второй справа).
Киевский институт Гражданского воздушного флота, 3-ий курс. 1948 год

Демонстрация оборудования лаборатории радиомонтажа начальнику Управления учебных заведений Министерства гражданской авиации СССР

году Клименко Петр Павлович был награжден нагрудным знаком «Отличник аэрофлота».

Петр Павлович занимался также и научной деятельностью — в 1968 году он защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук, ему присвоено ученое звание доцент.

Начальник Минского авиационного технического училища гражданской авиации (1974–1981 годы)

В 1974 году начался новый отсчет в жизни как Петра Павловича, так и нашего учреждения — было создано Минское авиационное техническое училище гражданской авиации. Чтобы понять причины его создания, нужно вспомнить реалии того времени. В 1960–1970 годы наблюдалось наиболее интенсивное развитие и совершенствование гражданской авиации Советского Союза. Это требовало квалифицированных летных и инженерно-технических кадров, подготовка которых должна была осуществляться в соответствующих учебных заведениях.

Предложение Министерства гражданской авиации об открытии в городе-герое Минске первого в республике авиационного учебного заведения было поддержано Правительством Беларуси и Первым секретарем ЦК КПБ Машеровым Петром Мироновичем. Приказом Министерства гражданской авиации СССР Петр Павлович был назначен на должность начальника вновь созданного училища.

Под его руководством в сжатые сроки был сформирован первичный кадровый состав, создана учебная и материально-техническая база училища. С точки зрения организации он создал команду: не просто коллектив, а команду, и очень сильную!

В «Краткой летописи Минского государственного высшего авиационного колледжа» сохранились слова Петра Павловича в год первого набора курсантов:

— Минское авиационное техническое училище гражданской авиации начало свой первый учебный год. 250 юношей с разных концов страны — из Узбекистана, Грузии, Азербайджана, Литвы, Латвии, России, Белоруссии и других республик получают у нас специальности техников-электриков по эксплуатации авиационных приборов и электрооборудования, и радиотехников по технической эксплуатации радиооборудования самолетов. Интерес юношей к нашему училищу был настолько большим, что мы вынуждены были объявить конкурс, определить проходной балл. Таким образом, к нам смогли попасть лучшие из лучших, те, кто показал хорошие знания по математике, русскому языку и литературе, кто успешно прошел медицинскую комиссию.

Там же рассказывается о том, как Петр Павлович «с гордостью хорошего хозяина» показал отлично оборудованные лаборатории и кабинеты, спортивный зал и кинозал, общежитие, где живут курсанты, столовую, отделение связи, медпункт и библиотеку:

— Все это только начало, — говорит Клименко П. П. — Многое еще будет сделано для того, чтобы курсанты себя чувствовали в училище как дома, жили содержательной и интересной жизнью, стали настоящими специалистами.

С коллегами из Учебного центра подготовки и переподготовки авиационного персонала

Петр Павлович со своим товарищем — Заикиным Александром Ивановичем

Для нас, живущих в мире высоких технологий, интересным фактом является то, что «во время своих лекций Клименко П. П. одним из первых стал применять технические средства обучения. Это, разумеется, дало положительный результат в освоении курсантами учебной дисциплины». Молодые преподаватели вскоре также взяли пример с начальника училища.

В 1980 году — награжден Почетной грамотой Верховного Совета БССР. В 1989 году ему было присвоено почетное звание «Заслуженный работник транспорта БССР» — в белорусской гражданской авиации единицы получали такую награду...

Петр Павлович обладал удивительным талантом объединять людей. Он мог любого привлечь в свою ауру и обаять харизмой. Как руководитель он был тактичным и дипломатичным, но в то же время целеустремленным.

Многое, что было сделано в тот далекий период, не потеряло своей актуальности и используется в настоящее время — военная подготовка курсантов, учебный аэродром, высокие стандарты в подготовке авиаспециалистов...

Жизнь после училища

С 1981 по 2000 год до выхода на пенсию Петр Павлович Клименко работал командиром Учебного центра подготовки и переподготовки авиационного персонала Государственного комитета по авиации Республики Беларусь. С 1979 по 1985 год избирался депутатом Заводского районного Совета г. Минска.

Уже уйдя с поста начальника училища, Петр Павлович продолжал интересоваться тем, как складывается судьба учреждения. Он, как родоначальник, конечно, болел за училище, в становление которого вложил знания и опыт, прирос душой.

Увлечения и привязанности

Петр Павлович Клименко был настоящим интеллектуалом — у него была огромная библиотека и отменная память. При случае он мог процитировать кого-то из классиков или сочинить на ходу собственную эпиграмму.

Клименко П. П. имел огромное количество знакомств, но в части близкого общения Петр Павлович был избирателен, поддерживал преимущественно родственные связи.

Один из хороших друзей Петра Павловича — Заикин Александр Иванович. Их связывала длительная и теплая дружба. Оба — книголюбы, которые с удовольствием обсуждали вместе прочитанное.

Значительную часть своей жизни Клименко П. П. посвятил занятиям астрономией — изучал теорию относительности Эйнштейна, классическую теорию тяготения Ньютона, небесную механику... Своеобразное хобби, тоже связанное с небом.

Петра Павловича не стало 7 января 2008 года, он умер в возрасте 81 года. Но память о нем сохраняется и по сей день, ведь это человек, достойный того, чтобы о нем не забывать.

Статья подготовлена
магистром филологических наук
Д.Э. Тарбецкой

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ES

УДК 539.2

Л. И. ГРЕЧИХИН

ФОРМИРОВАНИЕ P- И N- ПРОВОДИМОСТИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫМИ ИОНАМИ

Леонид Иванович Гречихин *– доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры естественнонаучных и общепрофессиональных дисциплин учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь*
gretchihin@yandex.ru

Leonid Gretchikhin *– Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor of the Department of Natural Science and General Professional Disciplines of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus*
gretchihin@yandex.ru

Аннотация: *во введении проведен анализ подходов в определении прохождения и сформулированы задачи по формированию электрического тока в полупроводниках. Показано, что в кристаллах структура поверхности не соответствует структуре самого кристалла. Электрический ток вдоль полупроводника определяется распространением электромагнитного поля вследствие поляризации основного материала и примесей. Поляризация возникает под действием температуры и приложенного внешнего электрического поля. Внешнее электрическое поле приводит к ориентационной поляризации и путем ионизации отрицательных ионов. Разница энергий сродства к электрону атомов основного материала и атомов примеси определяет контактную разность потенциалов. Для некоторых полупроводников определены критические значения температур, при которых происходит исчезновение электрической проводимости вследствие разрушения кристаллических структур.*
Ключевые слова: *полупроводник, кристалл, p-проводимость, n-проводимость, p-n переход, поляризация.*

Abstract: *in the introduction, the analysis of approaches to determining the passage is carried out and problems of the formation of electric current in semiconductors are formulated. It is shown that the surface structure in crystals does not correspond to the structure of the crystal itself. The electric current along the semiconductor is determined by the propagation of the electromagnetic field due to the polarization of the base material and impurities. Polarization occurs under the influence of temperature and an applied external electric field. An external electric field leads to orientational polarization and by ionizing negative ions. The difference in the electron affinity energies of the atoms of the base material and the impurity atoms determines the contact potential difference. For some semiconductors, the critical temperatures are determined at which the disappearance of electrical conductivity occurs due to the destruction of crystal structures.*
Keywords: *semiconductor, crystal, p-conductivity, n-conductivity, p-n junction, polarization.*

Электропроводимость разных сред является основной характеристикой при прохождении электрического тока. Определение электрического тока дано в работе [1]. Электрический ток есть упорядоченное движение электрических зарядов. Носителями зарядов могут являться: в металлах — электроны; в электролитах — ионы (катионы и анионы); в газах — ионы и электроны; в полупроводниках — электроны или дырки (электронно-дырочная проводимость).

Иногда электрическим током называют также ток смещения, возникающий в результате изменения во времени электрического поля. Но в этом случае перенос энергии происходит электромагнитным полем, а не заряженными частицами.

При протекании электрического тока в электролитах действительно электрический ток переносят катионы и анионы, а в электрических разрядах — электроны и положительно заряженные ионы.

В металлах электроны представляют собой Ферми-газ, распределение по энергиям в этом случае начинается с уровня Ферми и далее вглубь потенциальной ямы. Например, уровень Ферми отстоит от зоны проводимости для кристалла меди на удалении 1,633 эВ [2, 3], а для кристалла алюминия — на удалении ~ 1,9 эВ [2, 3]. Чтобы перевести электрон под действием приложенного электрического поля в зону проводимости с кристалла меди необходимо приложить напряженность поля ~ $6{,}4 \cdot 10^9$ В/м, а для алюминия ~ $6{,}9 \cdot 10^9$ В/м. Такие высокие напряженности электрического поля свидетельствуют о том, что по металлическим прово-

дам электроны в принципе проводить электрический ток не могут. Чтобы эту трудность устранить, Никола Тесла предложил рассматривать электрический ток как распространение электромагнитного поля. С этих позиций все законы постоянного тока определены в работе [4]. В результате было показано, что не металлы, а оксидный слой на поверхности металла является проводящей средой для распространения электромагнитного поля. Сами металлы вблизи абсолютного нуля переходят в состояние диэлектриков, и тогда электромагнитное поле внутри металла распространяется со скоростью света и возникает сверхпроводимость.

Для полупроводников ситуация более сложная. Чистые полупроводники в нормальных условиях являются диэлектриками. Электрические свойства полупроводников определяются не наличием в них свободных электронов, и, соответственно, положительно заряженных дырок, а их строением и механизмом ориентационной и температурной поляризаций с образованием дипольных электрических моментов [3]. Этот результат был получен путем рассмотрения электрического тока как распространения электромагнитного поля.

Особое практическое значение полупроводники получили, когда на их поверхность стали наносить другие элементы (*таблица 1*).

В *таблице 1* для кремния в скобках приведено значение максимума электронной плотности в распределении Ферми-Дирака. Когда на поверхность кремния наносят элементы с энергией сродства ~ 0,3 эВ, то кремний обладает *p*-проводимостью, а при нанесении атомов мышьяка, фосфора или селена кремний обладает *n*-проводимостью. В первом случае полагали, что носителями зарядов являются положительно заряженные дырки, а во втором случае носителями заряда являются электроны. Чтобы понять температурную зависимость электрического сопротивления полупроводников, был введен химический потенциал, который расположили посередине запрещенной зоны [5]. В этом случае удалось как-то качественно понять, как формируются электроны проводимости и положительно заряженные дырки. Поэтому промышленное производство элементной базы для развития электроники осуществляется в основном на интуитивной основе.

В этой связи возникла цель: четко сформулировать каким образом возникает *p*- и *n*-проводимость в полупроводниках с позиций формирования электрического тока не в виде движения электрических зарядов электронов и дырок, а вследствие распространения электромагнитного поля вдоль полупроводника. Для решения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. *Выяснить, как формируется кристалл и что происходит на его поверхности.*
2. *Определить механизм переноса энергии электромагнитного поля вдоль полупроводника.*
3. *Разработать теорию температурной зависимости электрического сопротивления полупроводника.*
4. *Установить механизм прохождения электрического тока в p-n переходе.*

Рассмотрим подробнее перечисленные задачи.

Формирование кристалла и его поверхности

Внутренняя структура кристалла каждого элемента таблицы Менделеева была определена с применением рентгеноструктурного анализа, и установлено, что кристаллы формируются атомами, валентные электроны которых обобщаются и внутри кристалла распределены по энергиям в соответствии с распределением Ферми-Дирака, т. е., образуют ферми-газ. При этом возникает коллективное взаимодействие, т. е., каждый атом взаимодействует с атомами ближайшего окружения, которые представляют собой первый координационный слой, а также, с некоторой вероятностью, взаимодействует со вторым и даже с третьим координационными слоями. Из структуры кристалла определяется вероятность взаимодействия каждого атома с первым, вторым и третьим координационным слоем. Такое коллективное взаимодействие внутри кристалла приводит к образованию кластеров. Образование кластерных структур внутри конденсированного состояния было установлено, преимущественно экспериментально в ра-

Таблица 1. Основные параметры вводимых элементов в кристалл кремния

Параметры	Вводимые элементы							Элемент
	Бор	Галлий	Теллур	Индий	Мышьяк	Фосфор	Селен	Кремний
Радиус атома, Å	1,166	1,811	1,429	1,999	1,355	1,253	1,221	1,18
Потенциал ионизации, эВ	8,30	6,00	9,01	6,79	9,82	10,49	9,75	8,15 (8,0)
Энергия сродства, эВ	0,277	0,300	0,200	0,300	0,810	0,747	2,021	0,52 1,39
Доля эмиссионных центров	0,288	0,693	0,432	0,846	0,387	0,333	0,315	0,846

ботах [6—10], а теоретически — в работах [2, 3, 8].

Взаимодействие кластерных структур определяет форму кристалла. Было установлено, что объемноцентрированная структура кристалла формируется кластерами в виде четырехгранной бипризмы, а гранецентрированная структура кристалла формируется кластерами в виде трехгранной бипризмы [11]. Для других типов кристаллов вид кластерных структур еще предстоит выяснить. Плотная упаковка кластерных структур приводит к образованию кристалла. При этом между кластерами возникают пустоты. Для ГЦК структуры — это пустоты $4{,}05R_0$, $3R_0$, $1{,}5R_0$, $0{,}5R_0$ и $0{,}3092R_0$, а для ОЦК структуры — $3{,}63R_0$, $1{,}5R_0$ и $0{,}4142R_0$. Пустоты $4{,}05R_0$, $3R_0$ и $0{,}3092R_0$ ГЦК структуры; $3{,}63R_0$ и $0{,}4142R_0$ ОЦК структуры имеют сфероидальную форму, а остальные пустоты — щелевидную форму и расположены хаотически друг относительно друга (R_0 — расстояние между частицами в кластере). Наличие щелевидных пустот в кристалле является причиной возникновения дислокаций и диффузии примесных атомов с поверхности внутрь кристалла. Это явление используется для упрочнения конструкционных материалов путем плазменно-ионного напыления [12] и для создания *p*- и *n*-проводимости в полупроводниках [13].

Состояние кристаллов в зависимости от температуры проходит ряд стадий. При очень низких температурах вблизи абсолютного нуля кристаллы формируются кластерами, которые содержат первый, второй и третий координационный слой. Атомы третьего координационного слоя принадлежат одновременно всем кластерам, которые его окружают. Кластеры как бы исчезают. Межкластерные объемы также пропадают, и кристалл переходит в состояние монолита. Экспериментально процесс нивелирования кластеров описан в работе [14]. В состоянии монолита металлы являются хорошими диэлектриками. По диэлектрикам электромагнитные волны распространятся со скоростью света. Если рассматривать электрический ток, как распространение электромагнитных волн, то металлы вблизи абсолютного нуля температуры должны обладать сверхпроводимостью [4]. Это действительно так! С повышением температуры энергия связи атомов с третьей координационной сферой разрывается, и внутри кристалла возникают неоднородности в виде сферических пустот возможно с одним свободным атомом. Электромагнитное излучение на таких пустотах интенсивно рассеивается, сопротивление распространению электромагнитных волн резко возрастает и сверхпроводимость пропадает.

С повышением температуры, когда происходит разрыв каждого атома с атомами второй координационной сферы, возникает плавление кристалла. В сферических пустотах появляются два, а в редких случаях даже три свободных атома, которые превращаются в двухатомные, а в некоторых условиях даже в трехатомные молекулы. Поэтому с поверхности жидкости происходит преимущественно испарение в виде двухатомных и даже трехатомных молекул, а не отдельных атомов, из которых состоит кристалл.

При дальнейшем повышении температуры происходит разрыв связи с первой координационной сферой. В этом случае возникает явление кипения. Кластеры полностью распадаются по всему объему кристалла, и поэтому испарение происходит не только с поверхности, но и внутри кристалла. В этом случае испарение происходит преимущественно трехатомными молекулами. Экспериментальные данные описаны в работах [15, 16].

На поверхности кристалла каждый атом взаимодействует не со всей координационной сферой, а с ее половиной. Если эта энергия связи меньше энергии связи с атомами поверхностного окружения, то формируются не объемные, а поверхностные кластеры, которые взаимодействуют между собой и образуют слой с большей энергией связи, чем внутри жидкого состояния. Это условие выполняется для большинства кристаллов. Поэтому поверхностный слой образуется с большей энергией бинарной связи между атомами и с более плотной упаковкой. Поэтому структура поверхностного слоя существенно отличается от строения кристалла внутри. Это известный экспериментальный факт, который долго не был осознан.

Если по такой бинарной структуре вдоль ее поверхности направить поток электромагнитного поля, то возникнет перенос энергии аналогично переносу энергии в процессе протекания постоянного электрического тока. Следовательно, перенос энергии электромагнитного поля должен подчиняться всем законам протекания постоянного электрического тока. Но в этом случае необходимо выяснить механизм, каким образом происходит перенос энергии вдоль полупроводника при собственной и примесной проводимости.

Механизм переноса энергии электромагнитного поля вдоль чистых полупроводников кремния и германия

Перенос энергии электромагнитного поля описывается вектором Пойнтинга:

$$\vec{P} = [\vec{E} \cdot \vec{H}], \qquad (1)$$

где $\vec{E}$ — напряженность электрического поля и $\vec{H}$ — напряженность магнитного поля.

В электромагнитном поле напряженность электрического поля связана с напряженностью магнитного поля следующей зависимостью:

$$\vec{E} = [\vec{v} \cdot \vec{B}] = \mu_0 \mu_r [\vec{v} \cdot \vec{H}]. \qquad (2)$$

Здесь $v = 1/\sqrt{\varepsilon\mu} = c/\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}$ — скорость распространения электромагнитных волн в среде с заданной диэлектрической $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$ и магнитной $\mu = \mu_r \mu_0$ проницаемостью. В свою очередь ε_r и μ_r являются относительной диэлектрической и магнитной проницаемостью, а $\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м и $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м по Зоммерфельду есть абсолютная диэлектрическая и магнитная проницаемость вакуума, и в свою очередь $c = 1/\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$ — скорость света в вакууме.

При распространении электромагнитной волны вдоль полу-

проводника электрическое поле у поверхности имеет тангенциальную и нормальную составляющие. Тогда вектор Пойнтинга приобретает вид:

$$\vec{P}=\left[\vec{E}_\tau\vec{H}\right]+\left[\vec{E}_n\vec{H}\right], \qquad (3)$$

где $\vec{E}_\tau$ и $\vec{E}_n$ — составляющие напряженности электрического поля вдоль проводника и нормально к его поверхности.

Для электрического тока проводимости первое слагаемое определяет закон Джоуля-Ленца, а второе слагаемое формируется током смещения, возникающего на поверхности полупроводника и определяет перенос энергии электромагнитного поля вдоль полупроводника. Так как плотности энергии электрического и магнитного поля равны, то из уравнения (3) следует, что на поверхности полупроводника $E_\tau=E_n$. Поэтому результирующая напряженность электрического поля электромагнитной волны по отношению к поверхности полупроводника направлена под углом 45°.

При прохождении электрического тока вдоль круглого полупроводника радиуса r напряженность магнитного поля $H=I/2\pi r$, а тангенциальная составляющая напряженности электрического поля $E_\tau=(\varphi_1-\varphi_2)/l$. Тогда второе слагаемое в уравнении (3), определяющее перенос энергии вдоль полупроводника, преобразуется к виду:

$$\varphi_1-\varphi_2=\sqrt{\frac{\mu_0\mu_r}{\varepsilon_0\varepsilon_r}}\frac{rl}{2\pi r^2}I. \qquad (4)$$

Такая линейная связь приложенного напряжения на участке распространения энергии электрического поля от тока установлена Омом и является законом Ома. Получается, что для полупроводников закон Ома также выполняется. Отличие заключается в разном определении относительной диэлектрической проницаемости и ином характере взаимодействия внешнего электрического поля с внутренними электрическими полями, которые обусловлены наличием наведенных и внутренних электрических диполей. Получается, что основное уравнение электромагнитного поля (2) является по существу законом Ома.

На основании (4) удельное сопротивление при распространении электромагнитного поля вдоль полупроводника круглого сечения для тангенциальной составляющей получаем:

$$\rho=\sqrt{\frac{\mu_0\mu_r}{\varepsilon_0\varepsilon_r}}\frac{r}{2}. \qquad (5)$$

Для большинства материалов, в том числе и для полупроводников, $\mu_r\approx 1$ и тогда удельное сопротивление обратно пропорционально корню квадратному из относительной диэлектрической проницаемости среды ($\sqrt{\varepsilon_r}$) и пропорционально $\sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}=120\pi$ — так называемому «волновому сопротивлению вакуума», а также радиусу полупроводника круглого сечения.

Из общего определения вектора электрического смещения следует, что:

$$\varepsilon_r=1+\frac{1}{\varepsilon_0E_\tau}\frac{\sum_i P_{э,i}}{\Delta V}=1+\frac{\sum_i n_i p_{э,i}}{\varepsilon_0E_\tau}, \qquad (6)$$

где суммирование производится по всем электрическим диполям $p_{э,i}$ встроенных и наведенных в объеме ΔV, а n_i — концентрация встроенных и наведенных дипольных электрических моментов. В большинстве случаев относительная диэлектрическая проницаемость значительно больше единицы. Тогда:

$$\varepsilon_r=\frac{\sum_i n_{a,i}p_{э,i}}{\varepsilon_0E_\tau}. \qquad (7)$$

Диэлектрическая проницаемость для дипольных частиц обусловлена тремя механизмами: 1 — ориентационной поляризацией свободных атомов внутри межкластерных пустот, обладающих встроенным дипольным электрическим моментом, 2 — установлением дипольных электрических моментов вследствие температурного заселения зоны проводимости с уровней энергии, расположенных в запрещенной зоне и 3 — наложением внешнего электрического поля. Рассмотрим упомянутые механизмы по отдельности.

Ориентационная поляризация

Атомы алмазных структур обладают большими дипольными моментами, которые связаны между собой диполь-дипольным взаимодействием, и образуют межкластерную решеточную структуру. Взаимное их расположение приводит к компенсации результирующего дипольного электрического момента. Некоторая доля атомов является свободной и эти атомы расположены в межкластерных пустотах. Диэлектрическую проницаемость определяют диполи свободных атомов и трехатомных молекул внутри межкластерных пустот. В двухатомных молекулах электрические диполи направлены друг против друга и поэтому такие молекулы не обладают дипольным электрическим моментом, и не участвуют в формировании диэлектрической проницаемости.

Концентрация свободных частиц в межкластерных пустотах равна:

$$n_{кл.}=n_{кл.,0}\int_{E_{св.,1}-3k_BT}^{\infty}f(E,T)dE. \qquad (8)$$

Здесь $n_{кл.,0}=1/8r^3_{кл.}$ и $E_{св.,1}$ — энергия связи между кластерами в кластерной решеточной структуре.

Температурная поляризация

При достаточно высоких температурах происходит существенное заселение валентными электронами кластеров, энергетические уровни которых, расположены в запрещенной зоне. Заселение этих уровней энергии определяется законом Больцмана. В условиях динамического равновесия количество актов возбуждения равно количеству актов испускания. В отсутствие внешнего электрического поля излучение электрических диполей, образовавшихся вследствие заселения возбужденных уровней энергии в запрещенной зоне, в разных направлениях равновероятное. При наложении внешнего электрического поля диполи располагаются вдоль направления напряженности электрического поля электромагнитной волны. В результате

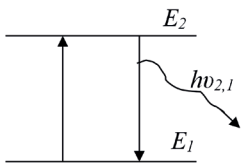


Рис. 1. Модель двухуровневой системы

этого возникает вынужденное излучение (на этом основана работа полупроводниковых лазеров).

Используя двухуровневую модель (*рис. 1*), рассмотрим, каким образом температурное возбуждение изменяет диэлектрическую проницаемость среды. На основании закона Больцмана получаем:

$$n_2 = n_1 \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_Б T}\right), \qquad (9)$$

где $\Delta E = E_2 - E_1$ и равна энергии разрешенных уровней в запрещенной зоне внутри или на поверхности кристалла. Уровень энергии n_2 по отношению к уровню n_1 определяется энергией сродства к электрону.

Если уровень энергии является уровнем Ферми, то относительно этого уровня возбужденный уровень обладает эффективным главным квантовым числом:

$$n^* = \sqrt{\frac{E_H}{\Delta E}}. \qquad (10)$$

Здесь E_H — энергия ионизации атома водорода.

При известном главном квантовом числе и радиусе орбиты возбужденного состояния, определяемом из значения энергии возбуждения для дипольного электрического момента двухуровневого перехода, получаем:

$$p_э = er = \frac{(Z^*)^2 e^2}{4\pi\varepsilon_0 \Delta E}. \qquad (11)$$

где Z^* — эффективный заряд нейтрального атома,

e — заряд электрона;

r — радиус частицы.

Исходные данные и результаты расчета дипольных электрических моментов для разных энергий возбуждения кристаллического кремния и германия в запрещенной зоне приведены в *таблице 2*. Для многоуровневой системы возбужденных энергетических состояний в соответствии с данными *таблицы 2* диэлектрическая проницаемость соответственно равна:

$$\varepsilon_r = 1 + \frac{n_0 \sum_k p_{э,k} \exp\left(-\frac{\Delta E_k}{k_Б T}\right)}{\varepsilon_0 E_э}, \qquad (12)$$

где n_0 — концентрация отрицательных ионов на поверхности кристалла. Из (12) следует, что диэлектрическая проницаемость при температурной поляризации обратно пропорциональна напряженности электрического поля электромагнитной волны. Это обусловлено тем, что включение вынужденного излучения уменьшает концентрацию частиц на возбужденном уровне энергии.

Оба механизма поляризации для чистых полупроводниковых материалов действуют независимо друг от друга. При низких температурах диэлектрическая проницаемость определяется преимущественно ориентационным механизмом свободных атомов внутри межкластерных пустот, а при высоких температурах — температурной поляризацией, которая очень быстро растет с температурой по экспоненте.

Удельное сопротивление в этом случае для разных материалов определяется по формуле (12). При измерениях удельного сопротивления разных материалов используют образцы в виде таблеток диаметром ~ 1 см и толщиной 3 мм. Если на такие таблетки подать напряжение 9 В, то внутри ее возникнет напряжение 3 кВ/м. Исходя из этих данных был произведен расчет удельного сопротивления и проводимости для кремния и германия, а затем по значению удельного сопротивления определялась эффективная диэлектрическая проницаемость в соответствии с формулой:

$$\varepsilon_r = \left(\frac{60\pi r_0}{\rho}\right)^2. \qquad (13)$$

В зависимости от температуры полученные значения проводимости и эффективной диэлектрической проницаемости для кремния приведены в *таблице 3*, а для германия — в *таблице 4*.

Для поликристаллического кремния следует учитывать, что места спайности между зернами заполняются молекулами кластерных образований. В случае кремния — это трехатомные молекулы Si_3.

Поляризация под действием внешнего электрического поля

Под действием приложенного внешнего электрического поля происходит поляризация атомов

Таблица 2. Значения радиуса орбиты вращения валентного электрона в атомах возбужденных состояний кристаллического кремния и германия и соответствующие им дипольные электрические моменты

Параметры	Энергии возбуждения кристаллического кремния, эВ					Энергии возбуждения кристаллического германия, эВ					
	0,84	1,03	1,38	2,04	2,49	0,12	1,47	1,81	1,94	2,28	2,44
$r_э$, нм	1,73	1,40	1,05	0,71	0,58	12,02	0,98	0,80	0,74	0,63	0,59
$p_э \cdot 10^{28}$ Кл·м	2,77	2,25	1,68	1,13	0,93	19,25	1,57	1,28	1,19	1,01	0,95

Таблица 3. Зависимость эффективной диэлектрической проницаемости и проводимости от температуры для кремния

Параметры	Температура, К											
	200	250	273	298	400	500	600	700	800	900	1000	1690
Кристаллический кремний при $E_э$ = 3 кВ/м и $r_{кл.}$ = 1,12 нм												
ε_r	4,00	4,00	4,01	4,01	4,03	4,06	4,20	5,34	10,35	25,16	60,56	2757
σ, (Ом·м)$^{-1}$	2,12	2,12	2,12	2,12	2,13	2,14	2,17	2,45	3,41	5,32	8,26	55,7
Гранулированный кремний при $E_э$ = 250 В/м												
ε_r	4,00	4,00	4,01	4,01	4,03	4,11	5,54	16,16	61,9	209	585	32200
σ, (Ом·м)$^{-1}$	2,12	2,12	2,12	2,12	2,13	2,15	2,49	4,26	8,35	15,33	25,6	190
Поликристаллический кремний $E_э$ = 1000 В/м												
ε_r	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01	1,2	3,80	17,1	64	189	-
σ, (Ом·м)$^{-1}$	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,07	1,27	2,07	4,39	8,5	14,6	-

и молекул внутри и на поверхности кристалла. Энергия поляризации в зависимости от направления приложенного поля будет увеличивать или ослаблять энергию сродства электрона к атому на поверхности полупроводника. В работе [17] энергия сродства определена как взаимодействие внешнего электрона со встроенным дипольным электрическим моментом атома, молекулы. Поэтому приложенное внешнее электрическое поле на отрицательный ион действует на электрон, захваченный атомом или молекулой. На внутренний встроенный дипольный электрический момент внешнее поле не действует, так как он скрыт внешними электронными оболочками. В этом случае энергию сродства (EA) можно представить как взаимодействие внешнего электрона с диполем, а действие электрического диполя представить в виде эффективного точечного заряда, т. е.,

$$EA = \frac{ep_э}{4\pi\varepsilon_0 r^2} = \frac{Z^* e^2}{4\pi\varepsilon_0 r}. \quad (14)$$

Отсюда $p_э = Z^* er$.

Радиус отрицательного иона r существенно не отличается от радиуса нейтрального атома [17]. Поэтому при известной энергии сродства на основании (14) определяется эффективный заряд отрицательного иона. Под воздействием внешнего электрического поля отрицательный ион поляризуется и тогда сила взаимодействия внешнего поля с валентным электроном каждой из частиц вещества должна быть скомпенсирована изменением внутренних сил связи валентного электрона с эффективным зарядом частицы. Следовательно [4]:

$$eE_э = \frac{Z^* e^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2} - \frac{Z^* e^2}{4\pi\varepsilon_0 (r \pm \Delta r_i)^2}, \quad (15)$$

где Δr_i — смещение зарядового облака отрицательного иона относительно его центра.

Из равенств (14) и (15) получаем для смещения зарядового облака:

$$\Delta r_i = \pm \frac{4\pi\varepsilon_0 E_э r^3}{2Z^* e}. \quad (16)$$

На поляризацию тратится работа:

$$A = eE_э \Delta r_i. \quad (17)$$

На основании (16) — (17) эффективное значение сродства к электрону для отрицательного иона составит:

$$EA_{эфф} = EA\left(1 \pm \frac{e^2 E_э^2 r^2}{2EA^2}\right). \quad (18)$$

Тогда плотность электрического тока в зоне проводимости с учетом эффективного сродства к электрону (18) равна [4]:

Таблица 4. Зависимость эффективной диэлектрической проницаемости и проводимости от температуры для кристаллического германия при $E_э$ = 3 кВ/м и $r_{кл.}$ = 1,32 нм

Параметры	Температура, К											
	40	80	100	200	273	298	400	500	600	800	1000	1200
ε_r	4,00	4,22	9,84	3892	24600	37600	$1{,}210^5$	$2{,}510^5$	$3{,}910^5$	$7{,}010^5$	$9{,}910^5$	$1{,}310^6$
σ, (Ом·м)$^{-1}$	2,12	2,18	3,33	66,2	166	205	372	527	664	887	1056	1191

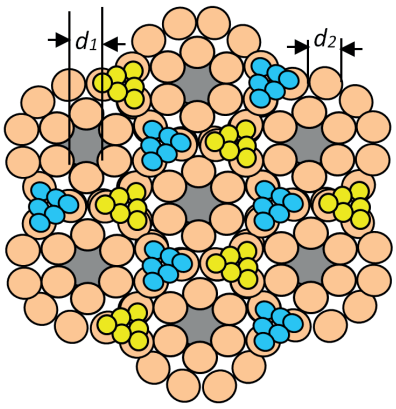


Рис. 2. Расположение примесей на поверхности кремния

$$J_T = \frac{E_Э}{60r}\sqrt{\varepsilon_r} = \sigma E_Э, \text{ А м}^{-2}, \quad (19)$$

где σ — удельная электропроводность, а относительная диэлектрическая проницаемость определяется по формуле (12) с заменой $\Delta E = EA_{эфф.}$. Получается, что плотность электрического тока в полупроводниках очень сложно зависит от приложенного внешнего электрического поля.

На основании (19) определяется примесная проводимость полупроводников, которая переходит в металлическую проводимость. Так примесная проводимость кремния с напылением бора переходит в металлическую проводимость при температуре 597 К, а примесная проводимость индия реализуется при температуре 711 К [15]. В этом случае происходит полная ионизация отрицательных ионов примесей.

Для отрицательного иона бора эффективный заряд равен 0,0224, а для мышьяка —0,0762. Применим эту модель для обоснования воздействия внешнего электрического поля на отрицательный ион примесных атомов при образовании *p-n* перехода.

Зависимость электрического сопротивления полупроводника от приложенного электрического поля

Относительная диэлектрическая проницаемость всегда значительно больше единицы. Тогда в формуле (12) единицей можно пренебречь. Тогда:

$$\varepsilon_r = \frac{\sum_i n_{a,i} p_{e,i}}{\varepsilon_0 E_\tau}. \quad (20)$$

Примесная проводимость значительно превосходит собственную проводимость полупроводников [15, 16]. Сама примесная проводимость полупроводников определяется только концентрацией вводимых примесей, а величина результирующего наведенного дипольного электрического момента под действием температуры и приложенного внешнего напряжения составит:

$$\sum_i n_{a,i} p_{e,i} = er_a n_{a,0} \exp\left[-\frac{EA}{k_b T}\left(1 \pm \frac{e^2 \Delta\varphi^2}{EA^2}\right)\right], \quad (21)$$

где $\Delta\varphi$ — приложенная разность потенциалов на монослое атомов примеси, $n_{a,0}$ — концентрация атомов примеси в поверхностном слое. Поверхность кремния формируется трехатомными молекулами [15]. Расположение примесей показано на *рис. 2*. На *рис. 2* обозначены размеры пустот d_1 и размер трехатомных молекул d_2 кремния. Расположение примесей в виде шести атомов показано разным цветом. Это обусловлено тем, что поверхность кремния знакопеременная, и поэтому возникает разная энергия связи примесей на поверхности кремния. Концентрация примесей на поверхности кремния в соответствии с *рис. 2* равна:

$$n_p \cong \frac{6 \cdot 4}{\pi (d_1 + 3d_2)^2 \cdot (d_2 + d_3)}. \quad (22)$$

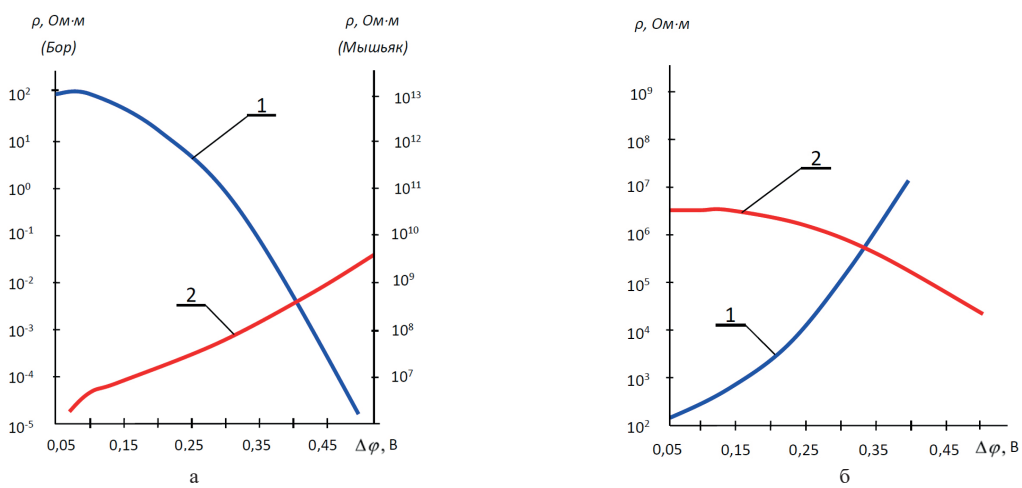


Рис. 3. Зависимость удельного сопротивления контакта бор-кремний (1) и контакта мышьяк-кремний (2):
а — напряженность внешнего электрического поля направлена от валентной зоны к зоне проводимости;
б — напряженность внешнего электрического поля направлена от зоны проводимости к валентной зоне

На основании (14) — (22) возможно полностью определить удельное сопротивление полупроводника с примесью и соответственно плотность тока.

Для металлов удельное сопротивление составляет 10^{-7}-10^{-8} Ом•м. Кремний с внедрением бора приобретает проводимость свойственную металлам при внешнем электрическом поле в направлении от валентной зоны к зоне проводимости, когда разность потенциалов в контакте бор-кремний достигает ~ 0,5 В. Кремний с внедрением мышьяка металлическую проводимость приобретает, когда разность потенциалов в контакте мышьяк-кремний составляет ~ 1,1 — 1,2 В. Как изменяется удельное сопротивление в контакте бор-кремний и мышьяк-кремний, приведено на *рис. 3*.

Из *рис. 3* следует: чем меньше энергия сродства вводимой примеси, тем существеннее изменяется удельное сопротивление в зависимости от величины приложенного внешнего электрического поля. По мере увеличения приложенного электрического поля примесная проводимость стремится к линейному спаду или возрастанию удельного сопротивления в логарифмическом масштабе по оси ординат, т. е. более четко реализуется экспоненциальная зависимость удельного сопротивления от приложенного внешнего электрического поля, что подтверждается экспериментальными данными [18].

Заключение

На основании проведенных исследований установлено:

1. В кристалле структура поверхности существенно отличается от внутренней структуры кристалла. Поверхность формируется поверхностными кластерами, а внутренняя структура — объемными кластерами. Кластеры образуются по-разному для двухатомных и трехатомных молекул.

2. Электрический ток в металлах определяется не движением свободных электронов и в полупроводниках электронов и «дырок», а распространением электромагнитного поля вдоль металлических и полупроводниковых материалов. В металлах распространение электромагнитного поля происходит по поверхностному оксидному слою, как по волноводу, а в полупроводниках электрический ток распространяется, как по волноводу внутри основного материала, диэлектрическая проницаемость которого определяется поляризацией основного материала и примесей.

3. Поляризация основного материала и поверхностных примесей в полупроводниках осуществляется совместным действием ориентационной, температурной составляющих и под действием приложенного внешнего электрического поля.

4. Под действием температуры в металлах возникают пустоты, плотность в которых значительно меньше, чем в основном материале. Поэтому при прохождении электромагнитного поля внутри проводника происходит интенсивное рассеяние и поглощение электромагнитного поля на неоднородностях. При падении электромагнитного поля на поверхность металла поглощение происходит в столбообразных пустотах, а их площадь по сравнению с общей площадью, занимаемой молекулами, составляет незначительную величину. Поэтому от металлов электромагнитное поле почти полностью отражается. Только небольшая доля падающего излучения поглощается и происходит разогрев металла.

5. В полупроводниках диэлектрическая проницаемость образуется вследствие поляризации основного материала и примесей с образованием наведенных дипольных электрических моментов. Никаких пустот при этом не образуется. Отражение незначительное, и падающее электромагнитное излучение проходит по полупроводнику без особого поглощения. Наличие на поверхности полупроводника примесей также не приводит к существенному изменению структуры исходного полупроводникового материала. Однородная структура при разных воздействиях на полупроводник не нарушает его структуру в отличие от металлов. Разные воздействия, приводящие к нарушению структуры полупроводника, являются критическими, они определены для ряда полупроводников по температуре и приложенному электрическому напряжению.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сивухин, Д. В. Общий курс физики / Д. В. Сивухин. – М.: Наука: Физматлит, 1996. – Т. III. Электричество. – 320 с.
2. Гречихин, Л. И. Физика наночастиц и нанотехнологий. Общие основы, механические, тепловые и эмиссионные свойства / Л. И. Гречихин. – Минск: Технопринт, 2004. – 399 с.
3. Гречихин, Л. И. Наночастицы и нанотехнологии / Л. И. Гречихин. – Минск: Право и экономика, 2008. – 406 с.
4. Гречихин, Л. И. Физика. Электричество и магнетизм. Современная электродинамика / Л. И. Гречихин. – Минск: Право и экономика, 2008. – 302 с.
5. Гречихин, Л. И. Основы физики твердого тела, атомного ядра и плазмы / Л. И. Гречихин, Я. В. Ленец. – Минск: МВИЗРУ, 1972. – 271 с.
6. Петров, Ю. И. Кластеры и малые частицы / Ю. И. Петров. – М.: Наука, 1983. – 368 с.
7. Фролов, И. А. Физико-химические основы кластерной динамики / И. А. Фролов // Кластерная динамика и физические основы прочности: сб. ст. – Горький: Изд. ГПИ им. М. Горького, 1983. – С. 3-24.
8. Суздалев, И. П. Нанокластеры и нанокластерные системы. Организация, взаимодействие, свойства / И. П. Суздалев, П. И. Суздалев // Успехи химии. – 2001. – Т. 70, вып. 3. – С. 203-240.
9. Ватолин, Н. А. Дифракционные исследования строения высокотемпературных расплавов / Н. А. Ватолин, Э. А. Пастухов. – М: Наука, 1980. – 189 с.
10. Еланский, Г. Н. Строение и свойства металлических расплавов / Г. Н. Еланский. – М.: Металлургия, 1991. – 160 с.
11. Гречихин, Л. И. Кластерный механизм механических и тепловых свойств монокристаллов и конструкционных материалов / Л. И. Гречихин // Машиностроение и техносфера XX1 века: сб. трудов X Международной научно-технической конференции. – Донецк: ДонНТУ, 2003. – Т. 1. – С. 185-202.
12. Полазменно-вакуумные покрытия: монография / Ж. А. Мрочек и др. – Минск: Технопринт, 2004. – 369 с.

13. Глазов, В. М. Физико-химические основы легирования полупроводников / В. М. Глазов, В. С.Земсков. – М.: Наука, 1967. – 371 с.
14. Макоганюк, Г. Д. Наноструктура поверхности кристаллов, подтвергшихся различным физическим воздействиям / Г. Д. Макоганюк, В. М. Фйдаров, А. Д. Седов // Молодежный инновационный форум Приволжского федерального округа, УлГТУ, 12-14 мая 2009 г. – Ульяновск: УлГТУ, 2009. – 183 с.
15. Gretchikhin, L.I. Formation of p- n-conductivity in semiconductors. /Journal "Military technical courier scientific periodical of the ministry of defence of the Republic of Serbia". – 2018. – V. 66, No. 3. – P. 304–321.
16. Гречихин, Л. И. Формирование p-, n-проводимости и p-n перехода / Л. И. Гречихин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2018. – Т. 14, № 5. – С. 231-238.
17. Gretchikhin L. I., Komarovskaya V. M. Negative ions of atoms, diatomic and threeatomic molecules / L. I. Gretchikhin, V. M. Komarovskaya V. M. // Military technical courier scientific periodical of the ministry of defence of the Republic of Serbia. – 2016. – V. 64, No. 2. – P. 447- 464.
18. Физические величины: справочник / А. И. Бабичев [и др.]; под ред. И. С. Григорьева, Е. Д. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

REFERENCES

1. Sivukhin, D. V. General course of physics. – M .: Science. Fizmatlit, 1996. – V. III. Electricity. – 320 p.
2. Grechikhin, L. I. Physics of nanoparticles and nanotechnologies, General foundations, mechanical, thermal and emission properties / L. I. Grechikhin. – Minsk: Technoprint Unitary Enterprise, 2004. – 399 p.
3. Grechikhin, L. I. Nanoparticles and nanotechnologies / L. I. Grechikhin. - Minsk: Law and Economics, 2008. – 406 p.
4. Grechikhin, L. I. Physics. Electricity and magnetism. Modern electrodynamics / L. I. Grechikhin. – Minsk: Law and Economics, 2008. – 302 p.
5. Grechikhin, L. I. Fundamentals of solid state physics, atomic nucleus and plasma / L. I. Grechikhin, Ya. V. Lenets. – Minsk: MVIZRU, 1972. – 271 p.
6. Petrov, Yu. I. Clusters and small particles / Yu. I. Petrov. – M .: Science, 1983. – 368 p.
7. Frolov I. A. Physical and chemical foundations of cluster dynamics / I. A. Frolov // Cluster dynamics and physical foundations of strength. – Gorky: Ed. GPI them. M. Gorky, 1983. – P. 3-24.
8. Suzdalev I. P. Nanoclusters and nanocluster systems. Organization, interaction, properties / I. P. Suzdalev, P. I. Suzdalev // Advances in chemistry. – 2001. – V. 70, No. 3. – P. 203-240.
9. Vatolin, N. A. Diffraction studies of the structure of high-temperature melts / N. A.Vatolin, E. A. Pastukhov. – M: Science, 1980. – 189 p.
10. Elansky, G. N. Structure and properties of metallic melts / G. N.Elansky. – M .: Metallurgy, 1991. – 160 p.
11. Grechikhin, L. I. Cluster mechanism of mechanical and thermal properties of single crystals and structural materials / L. I. Grechikhin // Mechanical Engineering and Technosphere of the XXI Century: Proceedings of the X International Scientific and Technical Conference. – Donetsk: DonNTU, 2003. – Vol. 1. – P. 185-202.
12. Polazmenno-vacuum coatings / J. A. Mrochek [et al.]. – Minsk: Technoprint Unitary Enterprise, 2004. – 369 p.
13. Glazov, V. M. Physical and chemical foundations of alloying semiconductors / V. M. Glazov, V. S. Zemskov. – M .: Science, 1967. – 371 p.
14. Makoganyuk, G. D. Nanostructure of the surface of crystals subjected to various physical influences. / G. D. Makoganyuk, V. M. Fidarov, A. D. Sedov // Youth Innovation Forum of the Volga Federal District. (UlSTU, May 12-14, 2009). – Ulyanovsk: UlSTU, 2009. – 183 p.
15. Gretchikhin, L. I. Formation of p- n-conductivity in semiconductors / L. I. Grechikhin // Military technical courier scientific periodical of the ministry of defense of the Republic of Serbia. – 2018. – V. 66, No. 3. – P. 304-321.
16. Grechikhi, L. I. Formation of p-, n-conductivity and p-n junction / L. I. Grechikhin // Hardening technologies and coatings. – 2018. – Vol. 14, No. 5. – P. 231-238.
17. Gretchikhin, L. I. Negative ions of atoms, diatomic and threeatomic molecules / L. I. Grechikhin, V. M. Komarovskaya // Military technical courier scientific periodical of the ministry of defense of the Republic of Serbia. – 2016. – V. 64, No. 2. – P. 447- 464.
18. Physical quantities: Handbook / A. I. Babichev [et al.]. – M .: Energoatomizdat, 1991. – 1232 p.

Статья поступила в редакцию
17.11.2021

УДК 37:004.946

И.Ю. АУШЕВ, Д.А. БЕЛЯЕВ, Д.Д. ЛИПНИЦКИЙ,
И.М. ШИШКО, К.В. БЕЛЯНКО

ТЕХНОЛОГИИ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРАКТИК

Игорь Юрьевич Аушев *– кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры промышленной безопасности учреждения образования «Университет гражданской защиты МЧС Беларуси», Республика Беларусь*
ai@ucp.by

Дмитрий Алексеевич Беляев *– председатель цикловой комиссии «Светотехническое, авиационное и радиоэлектронное оборудование» учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь*
dimba63@rambler.ru

Денис Дмитриевич Липницкий *– преподаватель цикловой комиссии «Светотехническое, авиационное и радиоэлектронное оборудование» учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь*
den.lipnitskiy03@mail.ru

Игорь Михайлович Шишко *– преподаватель цикловой комиссии «Светотехническое, авиационное и радиоэлектронное оборудование» учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь*
igoreks963@gmail.com

Ксения Владимировна Белянко *– преподаватель цикловой комиссии «Светотехническое, авиационное и радиоэлектронное оборудование» учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь*
belianko2608@gmail.com

Ihar Aushau *– Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Industrial Safety of University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of Belarus, Republic of Belarus*
ai@ucp.by

Dzmitry Beliayeu *– Chairman of the Cyclic Commission of Lighting, Aviation and Radio-electronic Equipment of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus*
dimba63@rambler.ru

Denis Lipnitski *– Teacher of the Cyclic Commission of Lighting, Aviation and Radio-electronic Equipment of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus*
den.lipnitskiy03@mail.ru

Igor Shishko *– Teacher of the Cyclic Commission of Lighting, Aviation and Radio-electronic Equipment of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus*
igoreks963@gmail.com

Kseniya Bialianka *– Teacher of the Cyclic Commission of Lighting, Aviation and Radio-electronic Equipment of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus*
belianko2608@gmail.com

Аннотация: *в статье проведен анализ возможности внедрения технологий виртуальной реальности при проведении технологической практики на отделении среднего специального образования учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», рассмотрен термин виртуальной реальности, полноценный комплект VR-набора. Показано, что внедрение средств виртуальной реальности будет способствовать повышению практикоориентированности обучения, и эффективности формирования профессиональных навыков и компетенций будущих авиационных специалистов.*
Ключевые слова: *виртуальная реальность, шлем и камера виртуальной реальности, контроллеры движений рук.*

Abstract: *the article analyzes the possibility of introducing virtual reality technologies during technological practice at the department of secondary specialized education of the Belarusian State Academy of Aviation, the term virtual reality, a full-fledged set of VR-set. It is shown that the introduction of virtual reality tools will contribute to improving the practice orientation of training, and the effectiveness of the formation of professional skills and competencies of future aviation specialists.*
Keywords: *virtual reality, virtual reality helmet and camera, hand movement controllers.*

В настоящее время многие авиационные предприятия, как производители, так и эксплуатанты авиационной техники, используют возможности виртуальной реальности (Virtual reality, далее VR) для обучения своего персонала. Например, во время пандемии компания «Rolls-Royce» начала применять эту технологию при производстве и обслуживании авиационных двигателей. Учебные заведения, в частности Университет гражданской защиты МЧС Беларуси [1], также все чаще используют элементы виртуальной и дополненной реальности в образовательном процессе, что позволяет визуализировать как

само оборудование, так и процессы его обслуживания, эксплуатации с учетом обеспечения безопасности, экономичности и практической направленности образовательного процесса [2 – 4]. VR-технологии используются в основном в тех случаях, когда физические макеты оборудования, действующие экземпляры слишком громоздки или их приобретение является затруднительным с экономической точки зрения. В частности, виртуальная реальность все шире применяется в авиационных учреждениях образования [5].

В гражданской авиации Республики Беларусь так же как и в других отраслях для подготовки инженерно-технического персонала используется авиационная техника, у которой со временем эксплуатации снижается технический ресурс, что приводит к дополнительным затратам на обслуживание и ремонт, а в некоторых случаях и к полной замене авиационного оборудования. С такой проблемой приходится сталкиваться и при осуществлении практической части обучения курсантов отделения среднего специального образования в учреждении образования «Белорусская государственная академия авиации» (далее – БГАА).

В этом плане, внедрение VR-технологий в образовательный процесс при проведении некоторых практических занятий и прохождении курсантами технологической практики в стенах академии является целесообразным, так как позволит более оперативно реагировать на развитие и усовершенствование авиационной техники. Применение программ, основанных на виртуальной реальности, позволит закрепить знания по составу, конструкциям различных блоков и систем, принципам работы приборного, электросветотехнического и радиоэлектронного оборудования, полученные во время теоретической части учебного процесса, и обеспечит возможность получения практических навыков обслуживания новой техники, физических образцов которой нет в учреждении образования. Помимо этого, VR-технологии будут способствовать наглядному знакомству с методикой технического обслуживания и ремонта, с процессом выявления отказов и неисправностей, возникающих при эксплуатации авиационного оборудования, а также с алгоритмами их устранения [5 – 12].

Настоящая работа посвящена рассмотрению возможности использования технологий виртуальной реальности для проведения монтажных и демонтажных операций при техническом обслуживании (ТО) радиоэлектронного и приборного оборудования. Использование такой технологии предоставит возможность курсантам овладеть достаточным объемом знаний о радиоэлектронном и приборном оборудовании, получить наглядное представление о расположении и составе авиационного оборудования и систем на воздушном судне (ВС), а также непосредственно выполнять техническое обслуживание и ремонт в виртуальной реальности. Это позволит выпускать техников высокой квалификации, которые будут пользоваться спросом у авиационных предприятий не только в Республике Беларусь, но и за рубежом.

Преимуществами использования VR-технологий в БГАА является повышение интереса у курсантов к образовательному процессу и привлечение потенциальных абитуриентов.

Виртуальная реальность (VR) – это трехмерная среда, генерируемая с помощью компьютера, с которой пользователь, полностью или частично в нее погружаясь, может взаимодействовать через свои ощущения: зрение, осязание и др. [2].

Термин «виртуальная реальность» был сформулирован и получил распространение с 1987 года, когда ученый в области визуализации данных и биометрических технологий Джарон Ланье основал компанию VPL и впервые выпустил очки и перчатки виртуальной реальности [3].

Полноценные VR-наборы (*рис. 1*) включают в себя: контроллеры, камеры и шлемы.

Рассмотрим каждый составляющий элемент полноценного VR-набора.

Контроллеры. Контроллеры способствуют управлению приложением. В сравнении с обычной клавиатурой или мышью контроллеры устроены сложнее (*рис. 2*). Помимо кнопок у них есть различные датчики.

Контроллеры определяют расстояние от рукоятки до каждого из пальцев, а также силу нажатия,

Рис.1. Комплект VR-набора

Рис.2. Контроллеры [4]

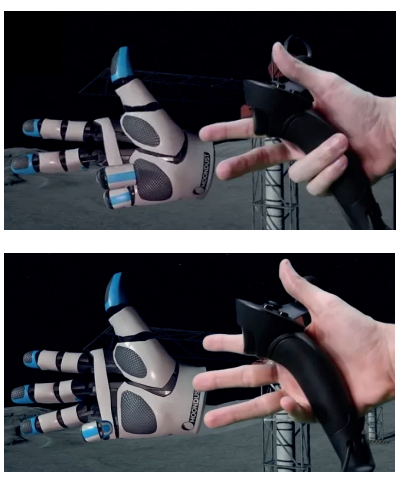


Рис.3. Управление движением виртуальной руки с использованием контроллеров [3]

Рис.4. Камера полноценного VR-набора [4]

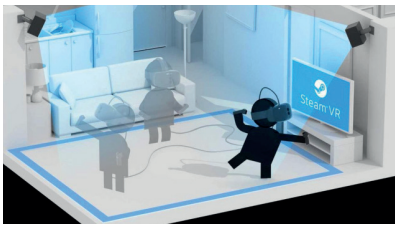


Рис.5. Границы пространства, отмеченные камерами [6]

Рис.6. Шлем [7]

Рис.7. Линзы в шлеме [7]

положение руки и многие другие функции (датчиков в контроллере больше 80). Это позволяет показать в приложении реалистичные руки, которые будут повторять движения пользователя (*рис. 3*).

Камеры. Камеры служат дополнительным источником ввода (считывают движения пользователя) и средством безопасности (*рис. 4*): есть возможность отметить границы, за которые нельзя выходить, а камеры будут предупреждать вас, когда вы будете возле этих границ (*рис. 5*).

Шлем. В шлеме тоже есть датчики. Например, гироскоп, который позволяет фиксировать положение и наклон головы. Но это не единственный вариант. Так, например, набор PS VR захватывает движения с помощью камеры, на шлеме (*рис. 6*) располагаются светящиеся полоски, по которым консоль понимает, в каком положении голова.

Линзы (*рис. 7*) помогают сфокусировать взгляд так, что мозг воспринимает виртуальный мир как реальный и более реалистичный. Это происходит благодаря когнитивному искажению. Поэтому даже посредственная по современным меркам графика выглядит хорошо [7].

Технологическая практика. Рассмотрим применение этой технологии непосредственно при проведении технологической практики. К примеру, проведем демонтаж выключателя коррекции, расположенного в техническом отсеке воздушного судна, который состоит из двух гироагрегатов и пульта управления. В первую очередь курсант должен, используя VR-шлем и контроллеры (*рис. 8*):

- *обесточить точную курсовую систему, в которую входит рассматриваемый выключатель коррекции;*
- *в техническом отсеке отсоединить штепсельные разъемы двух гироагрегатов;*
- *отсоединить заземление между агрегатами системы и самолетом;*
- *отсоединить штепсельные разъемы и подставку гироагрегатов от пола;*
- *откинуть потолочную панель, на которой установлен пульт управления системой, и отсоединить два штепсельных разъема;*
- *выкрутить четыре крепежных шурупа, затем аккуратно извлечь пульт;*
- *пульт управления и два гироагрегата установить на тележку с амортизаторами для дальнейшей проверки в лаборатории.*

В группе обучающихся, тестировавших VR-программу технического обслуживания оборудования ВС (вертолета Ми-8, самолета Ил-76) улучшились результаты тестирования. Использование этой программы позволило погрузиться в реальную ситуацию, когда конкретное ВС, прибыло на ТО и располагается в ремонтном ангаре. При этом у обучающихся задействуются зрительная и аудиальная память (*рис. 9*), что обеспечивает включение механизма формирования двигательных навыков в проведении монтажных и демонтажных работ, тем самым повышая уровень практической подготовки будущих авиационных специалистов, что согласуется с данными авторов [13].

Рис.8. Примеры использования VR-технологии на практике

Преимущества VR-технологий. Правдоподобность — поддерживает у курсанта ощущение реальности происходящего, вовлекает в процесс как мозг, так и тело курсанта, воздействуя на максимально воз-

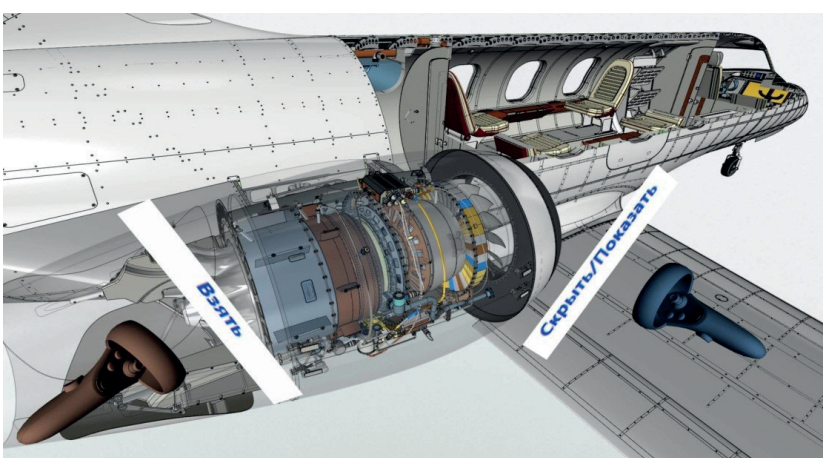


Рис.9. 3D-модель самолета в виртуальной реальности [8]

можное число органов чувств [8].

Интерактивность — обеспечивает взаимодействие курсанта с машинно-генерируемой виртуальной средой, которая базируется на мощном аппаратном и программном обеспечении.

Доступность — предоставляет возможность исследовать курсанту большой детализированный мир при относительно небольших материальных затратах.

Малогабаритность (в сравнении с воздушным судном и авиационным оборудованием).

Наглядность — виртуальное пространство позволяет детально рассмотреть объекты и процессы, которые невозможно или очень сложно проследить в реальном мире. Например, работу различного авиационного оборудования и систем.

Безопасность — в виртуальной реальности можно без каких-либо рисков производить монтаж и демонтаж оборудования, работать с системами электроснабжения воздушного судна и много другое. Независимо от сложности содержания программы практики курсант не нанесет вреда себе и другим.

Возможность коллективной работы в одном виртуальном пространстве.

Заключение

Одной из основных задач подготовки курсанта, как специалиста в сфере обслуживания авиационной техники, является наглядное представление алгоритма действий при проведении технического обслуживания и ремонта приборного, светотехнического и радиоэлектронного оборудования и систем.

Виртуальная реальность является перспективным инструментом образовательного процесса, современной технологией обучения, позволяющей дать курсантам наглядное представление об авиационной технике, путем погружения в виртуальную среду, в которой они могут практически научиться применять полученные теоретические знания.

Внедрение устройств виртуальной реальности в учреждении образования «Белорусская государственная академия авиации» будет способствовать повышению практикоориентированности обучения, формированию профессиональных навыков и компетенций будущих авиационных специалистов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Полевода, И.И. Технологии виртуальной и дополненной реальности в образовательном процессе / И.И. Полевода, А.Г. Иваницкий, А.С. Миканович, С.М. Пастухов, А.В. Грачулин, В.Н. Рябцев, О.Д. Навроцкий, А.О. Лихоманов, Г.В. Винярский, И.С. Гусаров // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2022. – Т. 6 № 1. – С. 119–141.
2. Уваров, А. Ю. Технологии виртуальной реальности в образовании / А. Ю. Уваров // Наука и школа. – 2018 – № 4. – С. 108-117.
3. Церфус, Д. Н. Виртуальная реальность как новая исследовательская технология и образовательная среда / Д. Н. Церфус, Г. В. Пятакова; А. А. Ульяновский // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2015. – С. 185-190.
4. Баюров, А. Е. Виртуальная реальность в образовании / А. Е. Баюров, О. А. Петрова // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2015. – С. 633-635.
5. Свиридов, С. Г. Внедрение технологий виртуальной реальности в процесс подготовки военных специалистов / С. Г. Свиридов, Н. А. Пеньков, Д. В. Митрофанов // Воздушно-космические силы. Теория и практика. – 2017. – № 4. – С. 171-178.
6. Россохин, А. В. Виртуальное счастье или виртуальная зависимость / А. В. Россохин, В. Л. Измагурова. – М.: Смысл, 2004. – 523 с.
7. Иванов, А. Ф. Об онотологическом статусе виртуальной реальности / А. Ф. Иванов. – СПб.: Санкт-Петербургское философское общество, 2000. – 16 с.
8. Полное погружение в виртуальную реальность: настоящее и будущее [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://fluxoid.ru/viar-slem.html.
9. Высокая производительность [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://redtrast.ru/a-183304294105703.
10. Смолин, А. А. Системы виртуальной, дополненной и смешанной реальности / А. А. Смолин, Д. Д. Жданов, И. С. Потемин. – СПб.: Университет ИТМО, 2018. – 60 с.
11. Таратута, Е. Е. Философия виртуальной реальности / Е. Е. Таратута. – СПб.: СПГУ, 2007. – 147 с.
12. T-FLEX PLM – работаем с цифровым двойником изделия в виртуальной реальности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://isicad.ru/ru/articles.php?article_num.
13. Бадзюк, И. Л.Применение технологий виртуальной реальности при изучении дисциплины «Первая помощь» / И. Л.Бадзюк, А. Р. Ермаков // Образование и право. – 2021. – № 7. – С. 321-325.

REFERENCES

1. Polevoda, I.I. Technologies of virtual and augmented reality in the educational process / I.I. Polevoda, A.G. Ivanitsky, A.S. Mikanovich, S.M. Pastukhov, A.V. Grachulin, V.N. Ryabtsev, O.D. Navrotsky, A.O. Likhomanov, G.V. Vinyarsky, I.S. Gusarov // Bulletin of the University of Civil protection of the Ministry of Emergency Situations of Belarus. – 2022. – Vol. 6 No. 1. – pp. 119-141.
2. Uvarov, A. Yu. Virtual Reality Technologies in Education / A. Yu.Uvarov // Science and School. – 2018 – No. 4. – P. 108-117.
3. Tserfus, D. N. Virtual reality as a new research technology and educational environment / D. N. Tserfus, G. V. Pyatakov; A. A. Ulyanovsky // Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia. – 2015. – P. 185-190.
4. Bayurov, A. E. Virtual reality in education / A. E. Bayurov, O. A. Petrova // Actual problems of aviation and cosmonautics. – 2015. – P. 633-635.
5. Sviridov, S. G. Implementation of virtual reality technologies in the process of training military specialists / S. G. Sviridov, N. A. Penkov, D. V. Mitrofanov // Aerospace forces. Theory and practice. – 2017. – No. 4. – P. 171-178.
6. Rossokhin, A. V. Virtual happiness or virtual addiction / A. V. Rossokhin, V. L. Izmagurova. – M.: Smysl, 2004. – 523 p.
7. Ivanov, A. F. On the onotological status of virtual reality / A. F. Ivanov. – SPb.: Saint-Petersburg Philosophical Society, 2000. – 16 p.
8. Full immersion in virtual reality: the present and the future [Electronic resource]. – Access mode: https://fluxoid.ru/viar-slem.html.
9. High performance [Electronic resource]. – Access mode: http://redtrast.ru/a-183304294105703.
10. Smolin, A. A. Systems of virtual, augmented and mixed reality / A. A. Smolin, D. D. Zhdanov, I. S. Potemin. – SPb.: ITMO University, 2018. – 60 p.
11. Taratuta, E. E. Philosophy of virtual reality / E. E. Taratuta. – SPb.: SPGU, 2007. – 147 p.
12. T-FLEX PLM - we work with a digital twin of a product in virtual reality [Electronic resource]. – Access mode: https://isicad.ru/ru/articles.php?article_num.
13. Badzyuk, I. L. The use of virtual reality technologies in the study of the discipline "First Aid" / I. L. Badzyuk, A. R. Ermakov // Education and Law. – 2021. - No. 7. – P. 321-325.

Статья поступила в редакцию 20.01.2022

УДК 621.396.96

А.Г. БОРОВОЙ, А.С. МАЛИКОВ, Т.А. ТИЩЕНКО

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИСПЕРСИИ ОШИБОК ПРИ РАСЧЕТЕ КООРДИНАТ ОБЪЕКТА В МНОГОПОЗИЦИОННОЙ РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНОЙ СИСТЕМЕ

Александр Григорьевич Боровой *– кандидат технических наук, доцент, военнослужащий учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь*

Alexander Borovoy *– Candidate of Technical Science, Associate Professor Serviceman of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus*

Алексей Сергеевич Маликов *– военнослужащий учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь*

Alexey Malikov *– Serviceman of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus*

Тарас Анатольевич Тищенко *– военнослужащий учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь*

Taras Tishchenko *– Serviceman of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus*

Аннотация: *при использовании решения задачи определения декартовых координат объекта разностно-дальномерной системой получено аналитическое решение расчета дисперсии ошибок. Проведен сравнительный анализ полученного решения в сравнении с методом Монте-Карло.*
Ключевые слова: *разностно-дальномерная система, измерительная позиция, декартовы координаты, дисперсия ошибок.*

Abstract: *using the solution of the problem of determining the Cartesian coordinates of an object by a difference-range-measuring system, an analytical solution was obtained for calculating the variance of errors. A comparative analysis of the obtained solution is carried out in comparison with the Monte Carlo method.*
Keywords: *difference-range-measuring system, measuring position, cartesian coordinates, error variance.*

Использование пассивных многопозиционных радиотехнических систем нашло свое широкое применение в радионавигации, радиолокации, радиотехнической разведке и т. д. Значительная часть таких систем использует в качестве первичной разностно-дальномерную информацию для определения декартовых координат объекта.

Определение декартовых координат в многопозиционной разностно-дальномерной системе не является новой. Вместе с тем, применение «классических» подходов характеризуется рядом проблем [1, 2], для решения которых был предложен способ [3], характеризующийся следующими основными преимуществами: отсутствие ограничений на количество и взаимное расположение измерительных позиций разностно-дальномерной системы; получение решения в виде прямого функционального преобразования первичных измеряемых параметров в декартовы координаты; одновременное решение задачи повышения точности и устранения неоднозначности. При этом представленное решение не учитывает наличие неравноточностных измерений, которое является постоянным ввиду неидентичности измерительных позиций разностно-дальномерной системы, энергетического и гео-

метрического факторов. Данный факт не позволяет организовать повышение точности определения декартовых координат за счет использования информации о статистических характеристиках ошибок измерения первичных измеряемых параметров.

Постановка и решение задачи

Рассматривается разностно-дальномерная навигационная система, состоящая из четырех измерительных позиций (ИП) (*рис. 1*). Координаты ИП задаются в прямоугольной ортодромической системе координат линейно независимыми радиус-векторами $\mathbf{r}_n = [x_n\ y_n\ z_n]^{\mathrm{T}}$, $n = 0...3$. Местоположение объекта определяется радиус-вектором $\mathbf{c} = [x_c\ y_c\ z_c]^{\mathrm{T}}$. Местоположение базовой ИП обозначаются квадратом, а треугольниками — остальные ИП. Точка с определяемыми координатами — окружностью.

Решение данной задачи представлено в [3]:

$$\mathbf{w} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{b}, \qquad (1)$$

где

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ s_0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_1 - x_0 & y_1 - y_0 & z_1 - z_0 & \Delta_1 \\ x_2 - x_0 & y_2 - y_0 & z_2 - z_0 & \Delta_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n - x_0 & y_n - y_0 & z_n - z_0 & \Delta_n \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{b} = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} \|\mathbf{r}_1\|^2 - \Delta_1^2 - \|\mathbf{r}_0\|^2 \\ \|\mathbf{r}_2\|^2 - \Delta_2^2 - \|\mathbf{r}_0\|^2 \\ \vdots \\ \|\mathbf{r}_n\|^2 - \Delta_n^2 - \|\mathbf{r}_0\|^2 \end{bmatrix}.$$

$\|\ \|$ — символ, обозначающий евклидову норму вектора.

Требуется найти дисперсии ошибок координаты вектора $\mathbf{c} = [x_c\ y_c\ z_c]^{\mathrm{T}}$.

Ограничения: решение представлено для задачи на плоскости; не учитываются ошибки определения координат ИП; измеренные значения разностей дальностей не коррелированы.

Для расчета дисперсии ошибок определения координат вектора с используется известное выражение [4]:

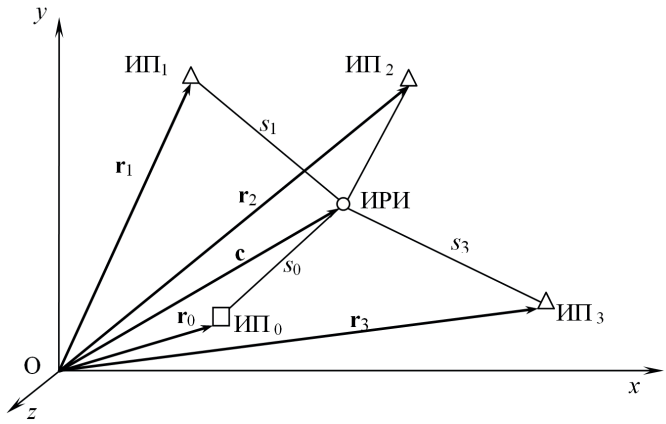


Рис. 1. Геометрия задачи определения координат объекта в разностно-дальномерной системе

$$D_{x_c(y_c)} = \sum_{i=1}^{3}\left(\frac{df_{x(y)}}{d\Delta_i}\right)_m^2 D_{\Delta_i}, \qquad (2)$$

где $D_{\Delta 1}$, $D_{\Delta 2}$, $D_{\Delta 3}$ — дисперсии ошибок определения разностей дальностей;

$c_{x(y)} = f_{x(y)}(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3, \Delta_1, \Delta_2, \Delta_3)$ — функциональная зависимость координат объекта от координат ИП и разностей дальностей;

$()_m$ — обозначение, показывающее использование вместо измеренных значений их математические ожидания.

Решение (1) не позволяет получить функциональную зависимость $f(\ )$ в явном виде. По этой причине необходимо перейти от векторно-матричного представления решения к системе уравнений. Для этого необходимо найти обратную матрицу $\mathbf{A}^{-1}$ в координатной форме [5]:

$$\mathbf{A}^{-1} = \frac{1}{\det(\mathbf{A})}\begin{bmatrix} A_{11} & A_{21} & A_{31} \\ A_{12} & A_{22} & A_{32} \\ A_{13} & A_{23} & A_{33} \end{bmatrix}, \qquad (3)$$

где $\det(\mathbf{A})$ — определитель матрицы А;

A_{ij} — алгебраические дополнения матрицы $\mathbf{A}$.

Определитель матрицы $\mathbf{A}$ равен:

$$\det(\mathbf{A}) = a_1\Delta_1 + a_2\Delta_2 + a_3\Delta_3; \qquad (4)$$

$$a_1 = (r_{2x} - r_{0x})(r_{3y} - r_{0y}) - (r_{3x} - r_{0x})(r_{2y} - r_{0y});$$

$$a_2 = (r_{3x} - r_{0x})(r_{1y} - r_{0y}) - (r_{1x} - r_{0x})(r_{3y} - r_{0y});$$

$$a_3 = (r_{1x} - r_{0x})(r_{2y} - r_{0y}) - (r_{2x} - r_{0x})(r_{1y} - r_{0y}).$$

Алгебраические дополнения матрицы $\mathbf{A}$ рассчитываются исходя из следующих зависимостей:

$$A_{11} = \Delta_3(r_{2y} - r_{0y}) - \Delta_2(r_{3y} - r_{0y});$$

$$A_{21} = \Delta_1(r_{3y} - r_{0y}) - \Delta_3(r_{1y} - r_{0y});$$

$$A_{31} = \Delta_2(r_{1y} - r_{0y}) - \Delta_1(r_{2y} - r_{0y});$$

Таблица 1. Условия моделирования процесса функционирования РДС

№ п/п	Наименование параметра	Значение параметра			
		ИП$_0$	ИП$_1$	ИП$_2$	ИП$_3$
1	Координаты ИП, r_x, r_y, км: расположение ИП №1 расположение ИП №2	25,25; 10,30	10,10; 40,40	40,10; 5,10	25,40; 30,10
2	СКО ошибки определения разности-дальности:	распол. ИП № 1		распол. ИП № 2	
	Δ_1, м Δ_2, м Δ_3, м	10 50 50		50 50 500	
3	Количество итераций при расчете дисперсий ошибок определения координат методом Монте-Карло, раз	500			

$$
\begin{aligned}
A_{12} &= \Delta_2(r_{3x}-r_{0x})-\Delta_3(r_{2x}-r_{0x});\\
A_{22} &= \Delta_3(r_{1x}-r_{0x})-\Delta_1(r_{3x}-r_{0x});\\
A_{32} &= \Delta_1(r_{2x}-r_{0x})-\Delta_2(r_{1x}-r_{0x});\\
A_{13} &= (r_{2x}-r_{0x})(r_{3y}-r_{0y})-(r_{3x}-r_{0x})\,(r_{2y}-r_{0y});\\
A_{23} &= (r_{3x}-r_{0x})(r_{1y}-r_{0y})-(r_{1x}-r_{0x})\,(r_{3y}-r_{0y});\\
A_{33} &= (r_{1x}-r_{0x})(r_{2y}-r_{0y})-(r_{2x}-r_{0x})\,(r_{1y}-r_{0y}).
\end{aligned}
\tag{5}
$$

Исходя из (2), дисперсии ошибок определения координат объекта c_x и c_y рассчитываются следующим образом:

$$
D_{c_x}=\left(\frac{df_x}{d\Delta_1}\right)_m^2 D_{\Delta_1}+\left(\frac{df_x}{d\Delta_2}\right)_m^2 D_{\Delta_2}+\left(\frac{df_x}{d\Delta_3}\right)_m^2 D_{\Delta_3};\quad D_{c_y}=\left(\frac{df_y}{d\Delta_1}\right)_m^2 D_{\Delta_1}+\left(\frac{df_y}{d\Delta_2}\right)_m^2 D_{\Delta_2}+\left(\frac{df_y}{d\Delta_3}\right)_m^2 D_{\Delta_3}. \tag{6}
$$

Функциональная зависимость координат объекта:

$$
c_x=f_x(\mathbf{r}_0,\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_2,\mathbf{r}_3,\Delta_1,\Delta_2,\Delta_3);\quad c_y=f_y(\mathbf{r}_0,\mathbf{r}_1,\mathbf{r}_2,\mathbf{r}_3,\Delta_1,\Delta_2,\Delta_3). \tag{7}
$$

$$
f_x=\frac{A_{11}b_1+A_{21}b_2+A_{31}b_3}{2\det(\mathbf{A})};\quad f_y=\frac{A_{12}b_1+A_{22}b_2+A_{32}b_3}{2\det(\mathbf{A})}. \tag{8}
$$

Для упрощения представления частных производных функции f_x вводятся следующие обозначения — $f_x = u/v$:

$$
\begin{gathered}
\frac{df_x}{d\Delta_1}=\frac{u'v-uv'}{v^2};\quad u=A_{11}b_1+A_{21}b_2+A_{31}b_3;\quad v=2\det(\mathbf{A});\\
u'=-2\Delta_1(\Delta_3(r_{2y}-r_{0y})-\Delta_2(r_{3y}-r_{0y}))+(r_{3y}-r_{0y})(\|\mathbf{r}_2\|^2-\|\mathbf{r}_0\|^2-\Delta_2^2)-(r_{2y}-r_{0y})(\|\mathbf{r}_3\|^2-\|\mathbf{r}_0\|^2-\Delta_3^2);\quad v'=2a_1.
\end{gathered}
\tag{9}
$$

$$
\begin{gathered}
\frac{df_x}{d\Delta_2}=\frac{u'v-uv'}{v^2};\quad u=A_{11}b_1+A_{21}b_2+A_{31}b_3;\quad v=2\det(\mathbf{A});\\
u'=-2\Delta_2(\Delta_1(r_{3y}-r_{0y})-\Delta_3(r_{1y}-r_{0y}))-(r_{3y}-r_{0y})(\|\mathbf{r}_1\|^2-\|\mathbf{r}_0\|^2-\Delta_1^2)+(r_{1y}-r_{0y})(\|\mathbf{r}_3\|^2-\|\mathbf{r}_0\|^2-\Delta_3^2);\quad v'=2a_2.
\end{gathered}
\tag{10}
$$

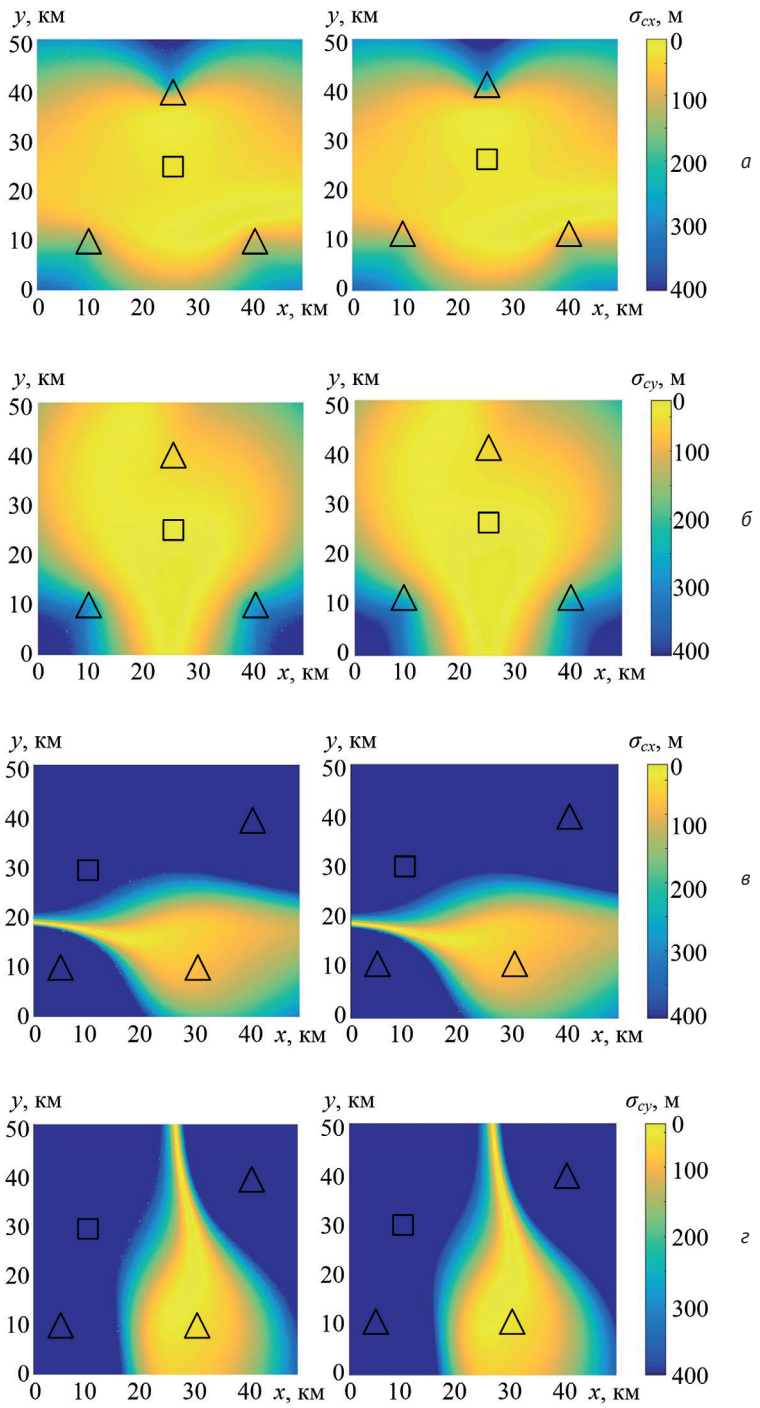


Рис.2. Рабочие зоны РДС с различной геометрией расположения ИП:
а, в – СКО ошибки определения координаты c_x;
б, г – СКО ошибки определения координаты c_y

$$\frac{df_x}{d\Delta_3}=\frac{u'v-uv'}{v^2};\quad u=A_{11}b_1+A_{21}b_2+A_{31}b_3;\quad v=2\det(\mathbf{A});$$
$$u'=2\Delta_3(\Delta_1(r_{2y}-r_{0y})-\Delta_2(r_{1y}-r_{0y}))+(r_{2y}-r_{0y})(\|\mathbf{r}_1\|^2-\|\mathbf{r}_0\|^2-\Delta_1^2)-$$
$$-(r_{1y}-r_{0y})(\|\mathbf{r}_2\|^2-\|\mathbf{r}_0\|^2-\Delta_2^2);\quad v'=2a_3. \tag{11}$$

В совокупности выражения (6, 9 – 11) позволяют рассчитать дисперсию ошибок определения координаты объекта c_x. Аналогичным образом рассчитывается дисперсия ошибки определения координаты объекта c_y.

Для подтверждения адекватности полученных результатов предлагается сравнить результаты расчета дисперсии ошибок при помощи синтезированного алгоритма и метода Монте-Карло [6]. Основные условия моделирования представлены в *таблице 1*. Моделирование процесса функционирования РДС осуществляется в программном комплексе MATLAB (№ SKR/1843-234) на участке пространства 50×50 км. В процессе моделирования местоположение объекта принимается равным значениям по двум осям от 0 до 50 км с шагом в 250 м, при этом после расчета значения дисперсий ошибок определения координат при ее превышении значения 160 000 м^2 ошибка принимается равной этой величине. Для упрощения визуализации результатов моделирования вместо дисперсии будет выводиться соответствующее значение среднеквадратического отклонения ошибки определения координат объекта.

Результаты моделирования представлены на *рис. 2* – в виде рабочих зон РДС. Под рабочими зонами РДС понимаются участки пространства, где СКО (среднеквадратичное отклонение) ошибки определения координат объекта не более заданной.

Представленные на *рис. 2* результаты позволяют говорить об идентичности значений СКО ошибок определения координат объекта, полученных методом Монте-Карло и предлагаемым способом [7]. Вместе с тем, отличия в расчете величины σ_{cx} и σ_{cy} не превышают 8,4 % во всех точках анализируемого пространства. Данное отличие связано с наличием погрешностей в расчете статистических характеристик методом Монте-Карло и применяемой линеаризацией для получения выражения (2).

Как отмечалось в [1], значительным преимуществом алгоритма определения координат в РДС, представленном в [3], является его инвариантность к расположению ИП, что позволяет анали-

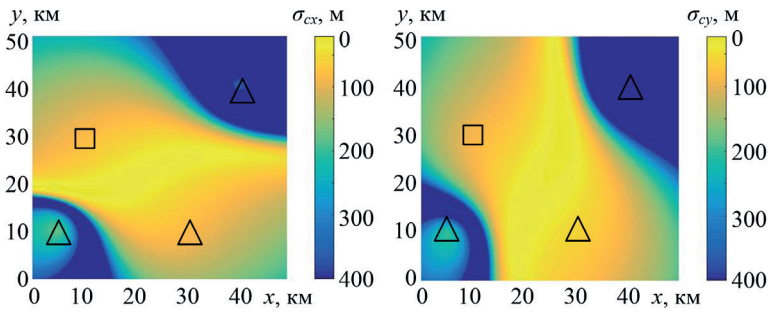


Рис.3. Рабочие зоны РДС

зировать рабочие зоны со сложной геометрией размещения ИП (*рис. 2, в* и *г*). В процессе моделирования имитировались две возможные ситуации: точность определения разности дальности на одной из пар ИП значительно выше, что может быть связано с модернизацией (улучшением) аппаратуры ИП РДС (*рис. 2, а* и *б*); точность определения разности дальности на одной из пар ИП значительно ниже, что может быть связано с отказом аппаратуры ИП РДС (*рис. 2, в* и *г*). Вторая тактическая ситуация позволяет априорно определить вид рабочей зоны РДС в случае значительного ухудшения характеристик одной из пар ИП. Для наглядного сравнения (расположение ИП № 2): в случае, если СКО ошибок определения всех разностей дальностей равной 50 м, внешний вид рабочей зоны представлен на *рис.* 3.

Представленные на *рис. 3* результаты позволяют качественно оценить изменение геометрии рабочей зоны РДС, при значительном ухудшении точности определения разности дальностей одной пары ИП (*рис. 2, в* и *г*).

Заключение

Одним из основных достоинств представленного выше решения задачи расчета дисперсии ошибок определения декартовых координат объекта в РДС является получение его в аналитическом виде. При этом полученное решение на первый взгляд кажется громоздким, однако большинство расчетов (где используются значения координаты ИП) могут быть проведены заранее, что в значительной степени упрощает вычисления. Вместе с тем расчет статистических характеристик (дисперсии ошибки) декартовых координат позволяет разработать алгоритмы повышения точности в условиях избыточности первичных измеряемых параметров в РДС.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Боровой, А. Г. Определение местоположения источника радиоизлучения группой беспилотных летательных аппаратов с использованием разностно-дальномерной информации / А. Г.Боровой, А. П.Кульпанович, К. И.Якуто // Авиационный вестник. – 2021. – № 4. – С. 39-42.
2. Степанов, А. О. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации / А. О. Степанов // Введение в теорию оценивания: часть 1 / А. О. Степанов. – Изд. 2-е испр. и доп. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор», 2010. – 509 с.
3. Калитин, С. Б. Конструктивные методы определения координат объектов в многопозиционных измерительных системах / С. Б. Калитин, К. К. Пащенко. – Минск: ВА РБ, 2018. – 198 с.
4. Боровой, А. Г. Векторно-алгебраическое решение задачи определения координат объекта в разностно-дальномерной радиотехнической системе / А. Г. Боровой, С. Б. Калитин, А. В. Шарамет // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь.– 2013. – № 2 (39). – С. 79-83.
5. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей: учебник / Е. С. Вентцель. – 6-е изд. стер. – М.: Высш. шк., 1999. – 576 с.
6. Гусак, А. А. Справочник по высшей математике / А. А. Гусак, Г. М. Гусак, Е. А. Бричикова. – Мн.: ТетраСистемс, 1999. – 640 с.
7. Уоткинс, Д. Основы матричных вычислений / Д. Уоткинс. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 664 с.

REFERENCES

1. Borovoy, A. G. Determining the location of a radio emission source by a group of unmanned aerial vehicles using difference-rangefinder information / A. G. Borovoy, A. P. Kulpanovich, K. I. Yakuto // Aviation Bulletin. – 2021. – No. 4. – P. 39-42.
2. Stepanov, A. O. Fundamentals of the theory of estimation with applications to the tasks of processing navigation information / A. O. Stepanov // Introduction to the theory of estimation: part 1 / A. O. Stepanov. – Ed. 2nd ispr. and add. – St. Petersburg: SSC RF JSC "Concern Central Research Institute "Electropribor", 2010. – 509 p.
3. Kalitin, S. B. Constructive methods for determining coordinates objects in multi-position measuring systems / S. B. Kalitin, K. K. Pashchenko. – Minsk: VA RB, 2018. – 198 p.
4. Borovoy, A. G. Vector-algebraic solution of the problem of determining the coordinates of an object in a difference-rangefinder radio engineering system / A. G. Borovoy, S. B. Kalitin, A. V. Sharameth // Vestn. Military. acad. Rep. Belarus.– 2013. – № 2 (39). – P. 79-83.
5. Wentzel, E. S. Probability theory: textbook / E. S. Wentzel. – 6th ed. ster. – M.: Higher School, 1999. – 576 p
6. Gusak, A. A. Handbook of Higher Mathematics / A. A. Gusak, G. M. Gusak, E. A. Brichikova. – Mn.: TetraSystems, 1999. – 640 p.
7. Watkins, D. Fundamentals of matrix computing / D. Watkins. – M.: BINOM. Laboratory of Knowledge, 2006. – 664 p.

Статья поступила в редакцию
12.04.2022

УДК 629.113.073

Ю.А. ГУРВИЧ, А.Ю. ДЕМКО, О.С. ПОРОЖНЮК

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ВЫБОР В ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МЕХАНИКЕ

Юрий Абрамович Гурвич *– кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры естественнонаучных и общепрофессиональных дисциплин учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь*
gu1944@yandex.by

Yuri Gurvich *– Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Natural Science and General Professional Disciplines of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus*
gu1944@yandex.by

Антон Юрьевич Демко *– курсант факультета гражданской авиации учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь*
dmk2002@mail.ru

Anton Dzemka *– Cadet of the Faculty of Civil Aviation of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus*
dmk2002@mail.ru

Олег Сергеевич Порожнюк *– курсант факультета гражданской авиации учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь*
tosman_3@mail.ru

Oleg Parazhniuk *– Cadet of the Faculty of Civil Aviation of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus*
tosman_3@mail.ru

Аннотация: *в последнее время для ускорения разработки и постановки на производство новых поколений колесных машин стали успешно применять различные по сложности и объему расчетно-методические многокритериальные аппараты – РММА.*
Методы рационального решения, идентификации и выбора реализованы в решениях различных составных статических конструкций и в десяти задачах кинематики сложного движения точки. Метод рационального решения многоэлементных составных статических конструкций позволяет из множества решений выбрать такое решение, которое соответствует минимуму вычислительных процедур или действий.
Применение в учебном процессе методов рационального решения, идентификации и выбора составных конструкций и кинематики сложного движения точки способствует: формированию у курсантов навыков многокритериального мышления; сокращению разрыва между современными методами проектирования машин в виде – РММА и знаниями обучающихся по теоретической механике.
Ключевые слова: *рациональное решение, идентификация и многокритериальный выбор, многоэлементные составные конструкции, кинематика сложного движения точки.*

Abstract: *in order to accelerate the development and production of new generations of wheeled vehicles have begun to successfully apply various in complexity and volume of computational and methodical multi-criteria devices – RMMA.*
Methods of rational solution, identification, and selection are implemented in solutions of composite static constructions of varying complexity and in ten problems of kinematics of complex point motion. The method of rational solution of multi-element composite static constructs allows you to choose from a variety of solutions that correspond to a minimum of computational procedures or actions.
The use in the educational process of the methods of rational decision, identification and selection of composite structures and kinematics of the complex movement of the point contributes to: the formation of multi-criteria thinking skills in cadets; reducing the gap between modern methods of designing machines in the form of RMMA and the knowledge of students in theoretical mechanics.
Keywords: *rational solution, identification and multi-criteria choice, multi-element composite constructions, kinematics of complex point motion.*

Хорошо известно, что все задачи проектирования машин, их узлов и механизмов всегда многокритериальные. Однако, многие задачи проектирования, например, управляемых осей и мостов различных колесных машин до сих пор рассматриваются как однокритериальные.

Правда, в последнее время для ускорения разработки и постановки на производство новых поколений автобусов, грузовых автомобилей, самосвалов, тракторов, в конструкторских бюро заводов Республики Беларусь стали успешно применять различные по сложности и объему расчетно-методические многокритериальные аппараты — РММА, которые используют методы векторной оптимизации совокупности конструктивных параметров колесной техники [1—3].

При формировании РММА используются отдельные положения некоторых теорий: механики неголономных систем, устойчивости движения, стационарного и нестационарного качения колеса с шиной по твердой поверхности, математического моделирования, многокритериальной параметрической идентификации, многокритериального выбора, автоматического регулирования, множество Парето, вероятности и математической статистики, приближения функций [4].

Отдельные положения этих теорий в разных сочетаниях «сшивают» в единые целые, которые представляют теперь собой механико-математические модели различных конструкций самолетов, автомобилей и других колесных транспортных средств. Затем с помощью методов многокритериальной оптимизации выбирают такой набор конструктивных параметров машин, который удовлетворяет компромиссу совокупности критериев — управляемости, устойчивости, стабилизации и безопасности движения, плавности хода, усилию на рулевом колесе во всем частотном и скоростном диапазонах движения [3, 5—8].

Известно, что большинство конструкторов этим сложным механико-математическим методам в учреждениях высшего образования не обучали. Например, в литературе и в курсах лекций по теоретической и прикладной механике отсутствуют методы идентификации, выбора, многокритериального синтеза, а присутствует лишь описание методик решения задач анализа в статике, в которых ничего не говорится о рациональном решении. Следовательно, произошел разрыв между знаниями студентов, полученными ими в учреждении высшего образования, и теми знаниями, которые потребуются им для практической деятельности.

Чтобы сократить разрыв между этими знаниями, обучение студентов методам РММА необходимо продолжить в курсе «Теоретическая механика» в разделах «Статика» и «Кинематика сложного движения точки».

В многочисленной литературе по теоретической механике, в том числе и в [9], содержание статики абсолютно твердого тела составляют две основные задачи:

1. Задача о приведении системы сил: как данную систему сил заменить другой, в частности наиболее простой, ей эквивалентной. Например, систему сходящихся сил $\overline{F_i},\ i=\overline{1,n}$ приводят к одной силе — равнодействующей силе $\overline{R}=\sum_{i=1}^{n}\overline{F_i}$, а все остальные системы сил приводят к двум силовым характеристикам — главному вектору $\overline{R^*}=\sum_{i=1}^{n}\overline{F_i}$ и главному моменту $\overline{M_0}=\sum_{i=1}^{n}\overline{m_i}$ системы сил.
2. Задача о равновесии — каким условиям должна удовлетворять система сил, приложенная к данному телу (или материальной точке), чтобы она была уравновешенной системой.

При решении первой основной задачи все действующие на тело силы считаются известными. Эта задача важна не только в статике, но и в динамике.

Вторая задача часто ставится в тех случаях, когда равновесие заведомо имеет место, например, когда заранее известно, что тело находится в равновесии, которое обеспечивается связями, наложенными на тело. При этом условия равновесия устанавливают зависимость между всеми силами, приложенными к телу: во многих случаях с помощью этих условий удается определить опорные реакции. Недостатком этой задачи является отсутствие рационального решения систем алгебраических уравнений равновесия каждой из шести систем сил. При этом должен выполняться критерий — минимум вычислительных процедур или действий.

В литературе по теоретической механике в разделе «Кинематика сложного движения точки» также отсутствует изложение современных методов идентификации, многокритериального выбора и синтеза. Например, в учебнике по теоретической механике [9] установление связи между абсолютным движением точки, относительным движением и движением точки вместе с подвижной системой координат позволит решать следующие задачи:

1. *по заданному относительному движению точки и движению подвижной системы определить сложное движение;*
2. *заданное сложное движение разложить на составляющие движения.*

Данная статья обосновывает необходимость введения в курс «Теоретическая механика» в разделы «Статика составных конструкций» — ССК и «Кинематика сложного движения точки» — КСДТ современных методов многокритериальной идентификации и многокритериального выбора.

Цель работы. Разработать и применить методы рационального решения, идентификации и многокритериального выбора в решениях различных по сложности задач статики многоэлементных составных конструкций и задач кинематики сложного движения точки.

Для выполнения поставленной цели необходимо:

К двум существующим основным задачам статики добавить четыре новые задачи ССК:

1. *Задача о рациональном решении ССК.*
2. *Задача о многокритериальной идентификации ССК.*
3. *Задача о многокритериальном выборе статики ССК.*
4. *Синтез ССК.*

К двум существующим задачам кинематики сложного движения точки добавить три новые задачи:

1. *Задача о многокритериальной*

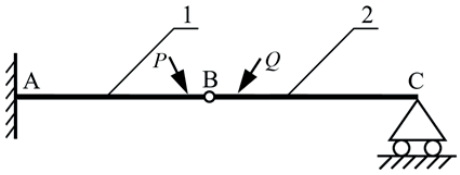


Рис.1. Схема составной статически определимой конструкции

идентификации КСДТ.

2. *Задача о многокритериальном выборе КСДТ.*
3. *Синтез КСДТ.*

Реализация четырех задач по статике и трех задач по кинематике позволит сократить разрыв между знаниями, получаемыми студентом в учреждении высшего образования, и теми знаниями, которые необходимы для использования методов РММА на практике.

I. Рациональное решение задач ССК

В литературе по теоретической механике в разделе «Статика» приводится описание двух способов определения реакций опор составных статически определимых конструкций.

Первый способ — рассматривается равновесие всей конструкции в целом, а затем — ее какой-либо отдельной части.

Второй способ — рассматривается равновесие каждой части конструкции отдельно. При этом дается лишь одна рекомендация по их применению: «Целесообразность применения того или иного способа решения задачи зависит от условия конкретной задачи», но ничего не говорится о рациональном решении этой задачи, при котором обеспечивается критерий — минимум вычислительных процедур или действий.

При решении задачи об определении реакций опор составной статически определимой конструкции, состоящей из двух тел (*рис. 1*), можно составить шесть линейно независимых уравнений равновесия — ЛНУР, что приводит к шести различным по сложности вариантам решения (*таблица 1*).

В *таблице 1*: 1 и 2 — ЛНУР, составленные для первой или второй части конструкции; 1 + 2 — ЛНУР, составленные для первой и второй части конструкции; (1 + 2) — ЛНУР, составленные для всей конструкции в целом.

Очевидно, что варианты решения под номерами 3, 4, 5, 6 в *таблице 1* намного сложнее из-за повторяющихся дважды цифр 1 или 2, чем решения под номерами 1 и 2. Для окончательного решения задачи необходимо ответить на вопрос: «Какое из решений 1 + 2 или 2 + 1 лучше и почему?».

Для статически определимой конструкции, состоящей из трех тел, можно составить 9 ЛНУР, приводящих к решению задачи 96 вариантами.

Для статически определимой конструкции, состоящей из четырех тел, можно составить 12 ЛНУР. При этом вариантов решения уже больше тысячи!

Поэтому вопрос о нахождении рационального решения задач статики составных статически определимых конструкций, обеспечивающего минимум вычислительных процедур или действий, является актуальным.

Для получения рационального решения задачи рекомендуется:

1. *Число ЛНУР и количество слагаемых в них сводить к минимуму.*
2. *Желательно, чтобы в уравнения равновесия моментов сил относительно точки входила одна неизвестная.*
3. *Желательно после выполнения одной вычислительной процедуры (или нескольких, но не всех) получить численный результат.*

Критериями рационального решения задач статики составных статически определимых конструкций являются:

1. *Работоспособность конструкции.*
2. *Вид системы сил.*
3. *Критерий СТ — степень статической определимости — неопределимости*:

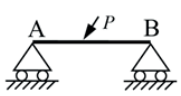
$$CT = H - \sum_{i=1}^{n} Y_i, \; i = \overline{1,n} \qquad (*)$$

где CT — целые числа; H — суммарное количество неизвестных составляющих реакций опор и шарниров составной конструкции; Y — количество ЛНУР, присущих каждой из шести систем сил; i — количество тел, входящих в составную конструкцию.

Если CT=0, то необходимо указать, работоспособна данная конструкция или нет. Например, конструкция с тремя подвижными опорами является неработоспособной, если при определенных условиях она может совершать движение. Если CT=0, конструкция работоспособная, то она является статически определимой и находится в равновесии. При CT>0 — конструкция статически неопределимая и находится в равновесии. Если CT<0 — конструкция геометрически изменяемая, в равновесии находиться не может.

Критерий — работоспособность конструкции:

— неработоспособная конструкция



— работоспособная конструкция

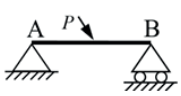


Таблица 1. Варианты решения

1	1 + 2	2	2 + 1	3	(1 + 2) + 1
4	(1 + 2) + 2	5	1 + (1 + 2)	6	2 + (1 + 2)

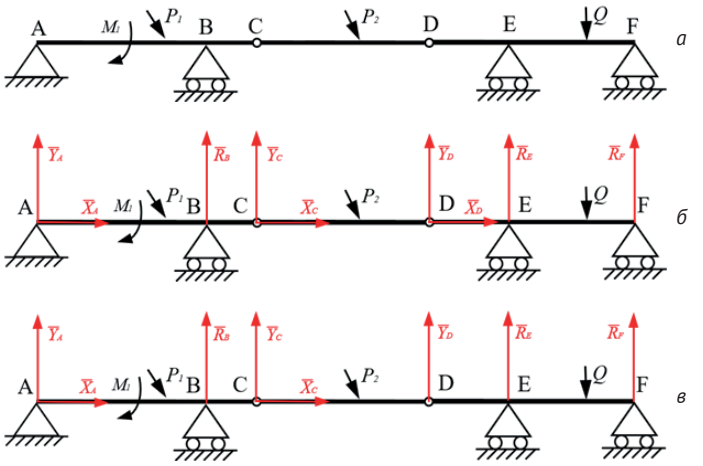


Рис.2. Схема трехэлементной составной конструкции с одной неподвижной и с тремя подвижными опорами

Покажем на примере трехэлементной составной статически определимой конструкции с одной неподвижной и с тремя подвижными опорами (*рис. 2, а*) применение критерия — вид системы сил.

Расставим составляющие реакций опор, действующих на трехэлементную балку ABCDF, в соответствии с видом опор и законами статики.

Сначала будем двигаться по балке от точки A к точке F: «**Слева – направо**».

При наличии наклонной силы P_2 должна появится горизонтальная составляющая реакции в точке D – X_D (*рис. 2, б*).

Затем будем двигаться от точки F к точке A: «**Справа – налево**».

При наличии четырех вертикальных сил R_F, Q, R_E, Y_D, действующих на абсолютно твердую балку FD, горизонтальная составляющая реакции в точке D – X_D возникнуть не может. Система сил, приложенная к балке FD, является плоской системой параллельных сил в отличие от плоской системы произвольных сил, приложенной к балкам DC и CA (*рис. 2, в*).

Применение критерия — вид системы сил при движении по балке сначала «**Слева – направо**», а затем «**Справа –налево**» позволяет минимизировать количество вычислительных процедур или действий при определении составляющих реакций опор различных конструкций многоэлементных балок.

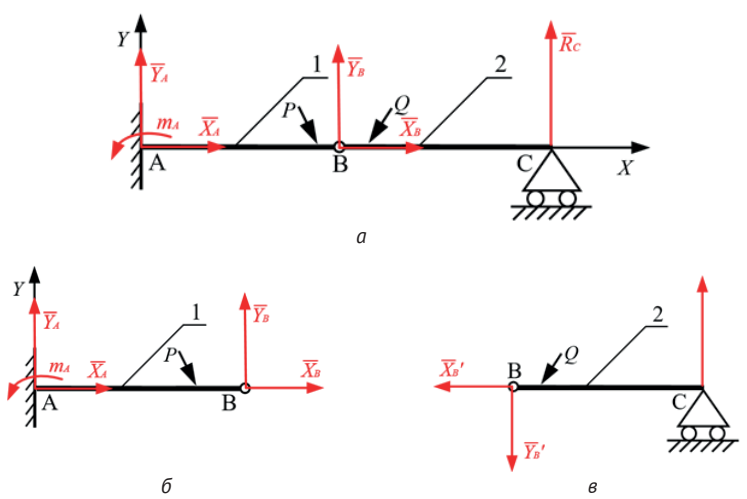


Рис.3. Схема составной статически определимой конструкции, где указаны реакции связей в опорах A и C и шарнире B

1.1. Рациональное решение составной конструкции, состоящей из двух тел с CT_i, $i=1, 2$

В работе рассматривается только плоская произвольная система сил, за счет расположенных на схемах балок под углом векторов сил P и Q.

В соответствии с формулой (*) определим CT всей конструкции (*рис. 3, а*).

Определим H, Y_i, CT, $i=1,2$:

1. $H=6$ (X_A, Y_A, m_A, X_B, Y_B, R_C);

2. $\sum_{i=1}^{2} Y_i = Y_1 + Y_2 = 3+3$;

3. $CT = H - (Y_1 + Y_2) = 6 - (3+3)$.

Двухэлементная конструкция – статически определимая.

Рассмотрим первую часть составной конструкции *рис. 3, б*.

Определим H_1, Y_1, CT_1:

1.1. $H_1=5$ (X_A, Y_A, m_A, X_B, Y_B);

1.2. $Y_1=3$ ($\sum X=0$, $\sum Y=0$, $\sum m_A=0$);

1.3. $CT_1=H_1-Y_1=5-3=2$ — первая часть конструкции дважды статически неопределимая.

Теперь рассмотрим вторую часть сочлененной конструкции, используя закон действия и противодействия (*рис. 3, в*):

2. Определим H_2, Y_2, CT_2:

2.1. $H_2=3$ (X'_B, Y'_B, R_C);

2.2. $Y_2=3$ ($\sum X=0$, $\sum Y=0$, $\sum m_B=0$);

2.3. $CT_2=H_2-Y_2=3-3=0$ — вторая часть конструкции статически определимая.

3. Используя ЛНУР для второй части сочлененной конструкции $\sum X=0$, $\sum Y=0$, $\sum m_B=0$, определим реакции опоры C и шарнира B — R_C, X'_B, Y'_B.

4. Приложим все силы к балке AB, используя формулы перехода:

$$\begin{cases} \overline{X_B}' = -\overline{X_B}, \\ \overline{Y_B}' = -\overline{Y_B}. \end{cases}$$

В результате балка AB стала статически определимой — $CT=0$.

5. Составим уравнения равновесия для балки AB $\sum X=0$, $\sum Y=0$,

$\Sigma m_A = 0$, из которых определим составляющие реакции опоры А — X_A, Y_A, m_A.

6. Алгоритм рационального решения задачи об определении реакций опор А и С и шарнира В — X_A, Y_A, m_A, X_B, Y_B, R_C двухэлементной составной конструкции «CT — 20» (где цифра 2 означает, что первая часть конструкции — дважды статически неопределимая, а цифра 0 — вторая часть конструкции — статически определимая) реализуется пунктами 1—5 при условии выполнения критерия — минимума вычислительных процедур или действий.

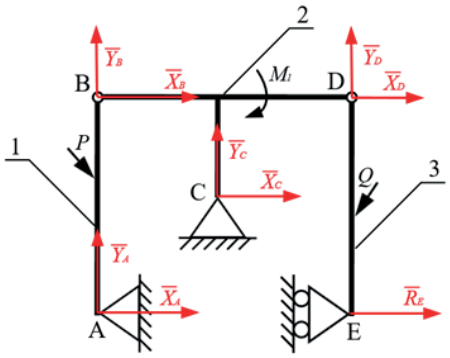


Рис.4. Схема трехэлементной составной конструкции с двумя неподвижными и с одной подвижной опорами

1.2. Рациональное решение статически определимых составных конструкций, состоящих из трех тел с CT_i, $i = 1, 2, 3$

Пример 1. Определение алгоритма рационального решения схемы трехэлементной составной конструкции с двумя неподвижными и с одной подвижной опорами с «CT — 130».

В соответствии с формулой (*) рассмотрим первую часть сочлененной конструкции (*рис. 4*).

1. Определим H_1, Y_1, CT_1:

1.1. $H_1 = 4$ (X_A, Y_A, X_B, Y_B);

1.2. $Y_1 = 3$ ($\Sigma X = 0$, $\Sigma Y = 0$, $\Sigma m_B = 0$);

1.3. $CT_1 = H_1 - Y_1 = 4 - 3 = 1$.

1.4. Используя уравнения равновесия пункта 1.2., определим X_A и X_B.

Рассмотрим вторую часть сочлененной конструкции:

2. Определим H_2, Y_2, CT_2:

2.1. $H_2 = 6$ (X'_B, Y'_B, X_C, Y_C, X_D, Y_D);

2.2. $Y_2 = 3$ ($\Sigma X = 0$, $\Sigma Y = 0$, $\Sigma m_C = 0$);

2.3. $CT_2 = H_2 - Y_2 = 6 - 3 = 3$.

Рассмотрим третью часть сочлененной конструкции:

3. Определим H_3, Y_3, CT_3:

3.1. $H_3 = 3$ (X'_D, Y'_D, R_E);

3.2. $Y_3 = 3$ ($\Sigma X = 0$, $\Sigma Y = 0$, $\Sigma m_D = 0$);

3.3. $CT_3 = H_3 - Y_3 = 3 - 3 = 0$.

4. Для третьей части сочлененной конструкции, у которой $CT = 0$, по уровнению равновесия пункта 3.2 определяем R_E, X_D, Y_D.

5. Используем формулу перехода от балки DE к балке BDC:

$$\begin{cases} \overline{X'_D} = -\overline{X_D}, \\ \overline{Y'_D} = -\overline{Y_D}. \end{cases}$$

6. Производим расчет X_C, Y_C, Y_B балки BDC, используя формулу перехода от балки AB к балке BDC:

$$\begin{cases} \overline{X'_B} = -\overline{X_B}, \\ \overline{Y'_B} = -\overline{Y_B}. \end{cases}$$

7. Составляющую реакции Y_A определим, используя $\Sigma Y = 0$.

8. Алгоритм рационального решения задачи с «CT — 130» об определении реакций опор А, С, Е и шарниров В и D трехэлементной составной конструкции X_A, Y_A, X_B, Y_B, X_C, Y_C, X_D, Y_D, R_E, реализуется пунктами 1—7 при условии выполнения критерия — минимума вычислительных процедур или действий.

Пример 2. Описание алгоритма рационального решения схемы трехэлементной составной конструкции с одной жесткой заделкой и с двумя подвижными опорами с «CT — 022».

В соответствии с формулой (*) рассмотрим первую часть сочлененной конструкции, изображенной на *рис. 5*:

1. Определим H_1, Y_1, CT_1:

1.1. $H_1 = 3$ (R_A, X_B, Y_B);

1.2. $Y_1 = 3$ ($\Sigma X = 0$, $\Sigma Y = 0$, $\Sigma m_B = 0$);

1.3. $CT_1 = H_1 - Y_1 = 3 - 3 = 0$.

Рассмотрим вторую часть сочлененной конструкции:

2. Определим H_2, Y_2, CT_2:

2.1. $H_2 = 5$ (X'_B, Y'_B, R_C, X_D, Y_D);

2.2. $Y_2 = 3$ ($\Sigma X = 0$, $\Sigma Y = 0$, $\Sigma m_D = 0$);

2.3. $CT_2 = H_2 - Y_2 = 5 - 3 = 2$.

Рассмотрим третью часть сочлененной конструкции:

3. Определим H_3, Y_3, CT_3:

3.1. $H_3 = 5$ (X'_D, Y'_D, X_E, Y_E, m_E);

3.2. $Y_3 = 3$ ($\Sigma X = 0$, $\Sigma Y = 0$, $\Sigma m_E = 0$);

3.3. $CT_3 = H_3 - Y_3 = 5 - 3 = 2$.

4. Для первой части сочлененной конструкции, у которой $CT = 0$, определим R_A, X_B, Y_B.

5. Используем формулу перехода от балки AB к балке BD:

$$\begin{cases} \overline{X'_B} = -\overline{X_B}, \\ \overline{Y'_B} = -\overline{Y_B}. \end{cases}$$

6. Производим расчет R_C, X_D, Y_D балки BD, у которой $CT = 0$.

7. Используем формулу перехода от балки BD к балке DE:

$$\begin{cases} \overline{X'_D} = -\overline{X_D}, \\ \overline{Y'_D} = -\overline{Y_D}. \end{cases}$$

8. Производим расчет X_E, Y_E, m_E

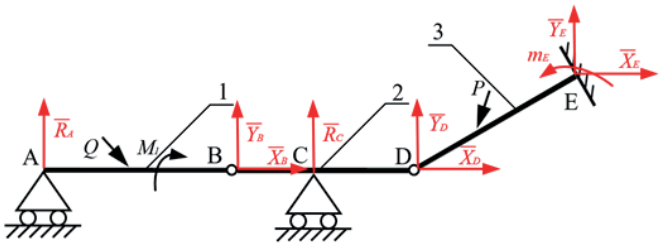


Рис.5. Схема трехэлементной составной конструкции с одной жесткой заделкой и с двумя подвижными опорами

балки DE, у которой $CT=0$.

9. Алгоритм рационального решения задачи с «CT — 022» об определении реакций опор A, C, E и шарниров B и D трехэлементной составной конструкции R_A, X_B, Y_B, R_C, X_D, Y_D, X_E, Y_E, m_E реализуется пунктами 1—8 при условии выполнения критерия — минимума вычислительных процедур или действий.

Пример 3. Описание алгоритма рационального решения схемы трехэлементной составной конструкции с одной жесткой заделкой и с двумя подвижными опорами с «CT — 040».

В соответствии с формулой (*) рассмотрим первую часть сочлененной конструкции, изображенной на *рис. 6*:

1. Определим H_1, Y_1, CT_1:

1.1. $H_1=3$ (R_A, X_B, Y_B);

1.2. $Y_1=3$ ($\sum X=0$, $\sum Y=0$, $\sum m_B=0$);

1.3. $CT_1=H_1-Y_1=3-3=0$.

Первая часть конструкции — статически определимая.

Рассмотрим вторую часть сочлененной конструкции:

2. Определим H_2, Y_2, CT_2:

2.1. $H_2=7$ (X'_B, Y'_B, X_C, Y_C, m_C, X_D, Y_D);

2.2. $Y_2=3$ ($\sum X=0$, $\sum Y=0$, $\sum m_C=0$);

2.3. $CT_2=H_2-Y_2=7-3=4$.

Рассмотрим третью часть сочлененной конструкции:

3. Определим H_3, Y_3, CT_3:

3.1. $H_3=3$ (X'_D, Y'_D, R_E);

3.2. $Y_3=3$ ($\sum X=0$, $\sum Y=0$, $\sum m_D=0$);

3.3. $CT_3=H_3-Y_3=3-3=0$.

4. Производим расчет реакций опор первой — R_A, X_B, Y_B и третьей — R_E, X'_D, Y'_D частей сочлененной конструкции, у которых $CT=0$.

5. Используя формулы перехода от балки AB к балке BDC и от балки DE к балке DBC, укажем все силы, действующие на вторую часть конструкции:

$$\begin{cases}\overline{X_B'}=-\overline{X_B},\\ \overline{Y_B'}=-\overline{Y_B}.\end{cases}\qquad \begin{cases}\overline{X_D'}=-\overline{X_D},\\ \overline{Y_D'}=-\overline{Y_D}.\end{cases}$$

6. Составим уравнения равновесия для балки BDC $\sum X=0$, $\sum Y=0$, $\sum m_C=0$, из которых определим реакции опор — X_C, Y_C, m_C.

7. Алгоритм рационального решения задачи с «CT — 040» об определении реакций опор A, C, E и шарниров B и D трехэлементной составной конструкции R_A, X_B, Y_B, X_C, Y_C, m_C, X_D, Y_D, R_E реализуется пунктами 1—6 при условии выполнения критерия — минимума вычислительных процедур или действий.

Пример 4. Описание алгоритма рационального решения схемы трехэлементной составной конструкции с одной жесткой заделкой и с одной неподвижной опорой с «CT — 211».

В соответствии с формулой (*) рассмотрим первую часть сочлененной конструкции, изображенной на *рис. 7*:

1. Определим H_1, Y_1, CT_1:

1.1. $H_1=5$ (X_A, Y_A, m_A, X_B, Y_B);

1.2. $Y_1=3$ ($\sum X=0$, $\sum Y=0$, $\sum m_A=0$);

1.3. $CT_1=H_1-Y_1=5-3=2$.

Рассмотрим вторую часть сочлененной конструкции:

2. Определим H_2, Y_2, CT_2:

2.1. $H_2=4$ (X'_B, Y'_B, X_C, Y_C);

2.2. $Y_2=3$ ($\sum X=0$, $\sum Y=0$, $\sum m_B=0$);

2.3. $CT_2=H_2-Y_2=4-3=1$.

Рассмотрим третью часть сочлененной конструкции:

3. Определим H_3, Y_3, CT_3:

3.1. $H_3=4$ (X'_C, Y'_C, X_D, Y_D);

3.2. $Y_3=3$ ($\sum X=0$, $\sum Y=0$, $\sum m_D=0$);

3.3. $CT_3=H_3-Y_3=4-3=1$.

4. Расчет производим третьей части сочлененной конструкции, у которой $CT=1$. Определим X_C, X_D из уравнений равновесия пункта 3.2.

5. Используем формулу перехода от балки DC к балке CB:

$$\begin{cases}\overline{X'_C}=-\overline{X_C},\\ \overline{Y'_C}=-\overline{Y_C}.\end{cases}$$

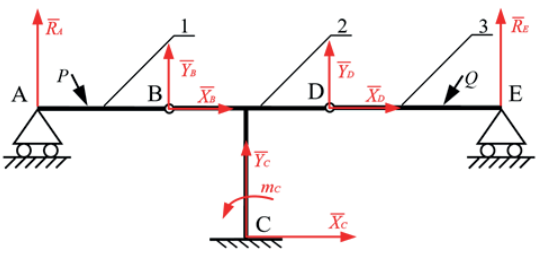


Рис.5. Схема трехэлементной составной конструкции с одной жесткой заделкой и с двумя подвижными опорами

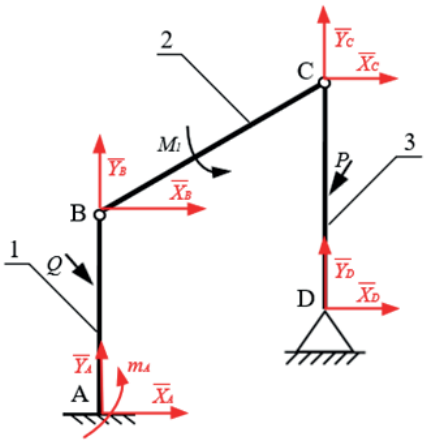


Рис.7. Схема трехэлементной составной конструкции с одной жесткой заделкой и с одной неподвижной опорой

6. Производим расчет X_B, Y_B, Y_C. балки СВ, у которой $CT=0$.

7. Используем формулу перехода от балки СВ к балке АВ:

$$\begin{cases} \overline{X'_B} = -\overline{X_B}, \\ \overline{Y'_B} = -\overline{Y_B}. \end{cases}$$

8. Производим расчет X_A, Y_A, m_A балки АВ, у которой $CT=0$.

9. Алгоритм рационального решения задачи с «CT — 211» об определении реакций опор A, D и шарниров B и C трехэлементной составной конструкции X_A, Y_A, m_A, X_B, Y_B, X_C, Y_C, X_D, Y_D реализуется пунктами 1—8 при условии выполнения критерия — минимума вычислительных процедур или действий.

Пример 5. Описание алгоритма рационального решения схемы трехэлементной составной конструкции с двумя неподвижными и с одной подвижной опорами с «CT — 121».

В соответствии с формулой (*) рассмотрим первую часть сочлененной конструкции, изображенной на *рис. 8*:

1. Определим H_1, Y_1, CT_1:

1.1. $H_1=4$ (X_A, Y_A, X_B, Y_B);

1.2. $Y_1=3$ ($\Sigma X=0$, $\Sigma Y=0$, $\Sigma m_A=0$);

1.3. $CT_1=H_1-Y_1=4-3=1$.

Рассмотрим вторую часть сочлененной конструкции:

2. Определим H_2, Y_2, CT_2:

2.1. $H_2=5$ (X'_B, Y'_B, R_C, X_D, Y_D);

2.2. $Y_2=3$ ($\Sigma X=0$, $\Sigma Y=0$, $\Sigma m_B=0$);

2.3. $CT_2=H_2-Y_2=5-3=2$.

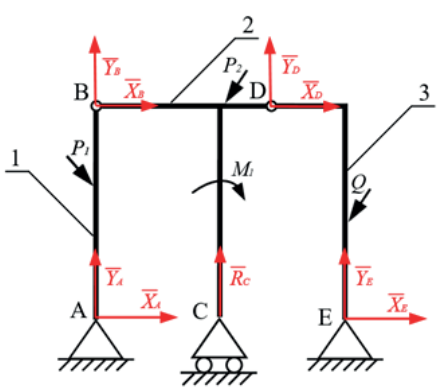


Рис.8. Схема трехэлементной составной конструкции с двумя неподвижными и с одной подвижной опорами

Рассмотрим третью часть сочлененной конструкции:

3. Определим H_3, Y_3, CT_3:

3.1. $H_3=4$ (X'_D, Y'_D, X_E, Y_E);

3.2. $Y_3=3$ ($\Sigma X=0$, $\Sigma Y=0$, $\Sigma m_D=0$);

3.3. $CT_3=H_3-Y_3=4-3=1$.

4. Расчет X_A, X_B производим первой части сочлененной конструкции, у которой $CT=1$.

5. Расчет X_D производим третьей части сочлененной конструкции, у которой $CT=1$. Для этого используем формулу перехода от балки АВ к балке BD:

$$\begin{cases} \overline{X'_B} = -\overline{X_B}, \\ \overline{Y'_B} = -\overline{Y_B}. \end{cases}$$

6. Из рассмотрения равновесия балки DE определим X_E, Y_E, Y_D.

7. Производим расчет балки BD, у которой $CT=0$, используя формулы перехода

$$\begin{cases} \overline{X'_D} = -\overline{X_D}, \\ \overline{Y'_D} = -\overline{Y_D}. \end{cases}$$

8. Определим из условия равновесия балки BD реакцию R_C.

9. Алгоритм рационального решения задачи с «CT — 121» об определении реакций опор A, C, E и шарниров B и D трехэлементной составной конструкции X_A, Y_A, X_B, Y_B, R_C, X_D, Y_D, X_E, Y_E реализуется пунктами 1—8 при условии выполнения критерия — минимума вычислительных процедур или действий.

II. Многокритериальная идентификация и многокритериальный выбор составных конструкций

При решении задач идентификации составных конструкций используются критерии: CT; количество тел, соединенных шарнирами; количество опор; вид опор; работоспособность конструкции; вид плоской системы сил — сходящихся, параллельных и произвольных сил.

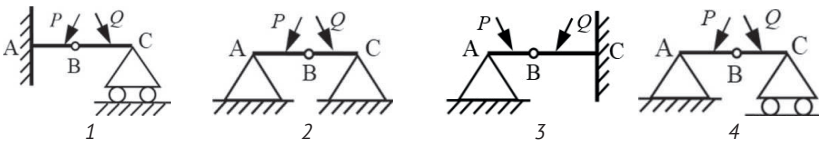


Рис.9. Схема составных конструкций

2.1. Многокритериальная идентификация составной конструкции, состоящей из двух тел

Задача № 1. Описание алгоритма идентификации одной из четырех схем конструкций (*рис. 9*) по пяти критериям, приведенным в *таблице 2* [10, 11].

Решение. Проанализируем *таблицу 2* на соответствие ее какой-либо одной из четырех схем *рис. 9*.

1. Определим критерий *CT* для каждой из четырех конструкций, используя (*):

1.1. $CT=0$ для первой конструкции, так как количество неизвестных реакций опор и шарниров равно шести X_A, Y_A, m_A, X_B, Y_B, R_C, а количество ЛНУР для двух тел АВ и ВС также равно шести:

- для балки АВ $\sum X=0$, $\sum Y=0$, $\sum m_A=0$;
- для балки ВС $\sum X=0$, $\sum Y=0$, $\sum m_C=0$.

Формула перехода от балки АВ к балке ВС:

$$\begin{cases} \overline{X_B}'=-\overline{X_B}, \\ \overline{Y_B}'=-\overline{Y_B}. \end{cases}$$

1.2. $CT=0$ для второй конструкции, так как количество неизвестных реакций опор и шарниров равно шести X_A, Y_A, X_B, Y_B, X_C, Y_C, а количество линейно независимых уравнений равновесия для двух тел АВ и ВС также равно шести.

1.3. $CT=1$ для третьей конструкции, так как количество неизвестных реакций опор и шарниров равно семи X_A, Y_A, X_B, Y_B, X_C, Y_C, m_C, а количество линейно независимых уравнений равновесия для двух тел АВ и ВС равно шести.

1.4. $CT=-1$ для четвертой конструкции, так как количество неизвестных реакций опор и шарниров равно пяти X_A, Y_A, X_B, Y_B, R_C, а количество линейно независимых уравнений равновесия для двух тел АВ и ВС равно шести.

Следовательно, критерию $CT=0$ удовлетворяют только две схемы конструкций 1 и 2.

2. Все четыре схемы конструкций удовлетворяют критерию — количество тел.

3. Критерию — количество опор удовлетворяют все четыре схемы конструкций.

4. Критерию — вид опор и их сочетания удовлетворяет только схема 2.

5. Все четыре конструкции работоспособны, так как находятся в равновесии.

Результаты индентификации. Всем пяти критериям соответствует только схема конструкции 2.

2.2. Многокритериальная идентификация составной конструкции, состоящей из трех тел

Задача № 2. Описание алгоритма идентификации одного из четырех номеров вариантов I-IV критериев *таблицы 3*: *CT*; количество тел, соединенных шарнирами; количество опор; вид опор и их сочетания; работоспособность конструкции схеме составной конструкции (*рис. 10*).

Решение. Проанализируем схему конструкции.

1. Число независимых составляющих реакций опор и шарниров составной конструкции равно девяти R_A, X_B, Y_B, X_C, Y_C, m_C, X_D, Y_D, R_E, количество линейно независимых уравнений равновесия также равно девяти, критерий — $CT=0$, — вариант III данному критерию не соответствует.

2. Критерию — количество тел удовлетворяют все четыре варианта.

3. Критерию — количество опор вариант I не удовлетворяет.

4. Критерию — вид опор и их сочетания удовлетворяет только вариант IV.

5. Критерию — работоспособность конструкции удовлетворяют все четыре варианта, так как рассматриваемая конструкции находится в равновесии.

Результаты индентификации. Схеме конструкции соответствует только вариант IV.

2.3.Многокритериальный выбор составных конструкций

При решении задач выбора составных конструкций используются критерии: *CT*; количество тел, соединенных шарнирами; количество опор; вид опор; работоспособность конструкции; вид плоской системы сил — плоская произвольная система сил [12—14].

2.3.1. Многокритериальный выбор составной конструкции, состоящей из двух тел

Рассмотрим примеры решения задач многокритериального выбора в статике составных конструкций.

Задача № 3: Описание алгоритма выбора критериев, которые соответствуют схеме составной конструкции (*рис. 11*).

Критерии:

1. Вид системы сил: плоская система сходящихся, параллельных и

Таблица 2. Критерии идентификации

CT	Количество тел	Количество опор	Вид опор и их сочетания	Работоспособность конструкции
0	2	2		Работоспособная

Таблица 3. Варианты критериев идентификации

№ варианта	Критерии				
	CT	Количество тел	Количество опор	Вид опор и их сочетания	Работоспособность конструкции
I	0	3	4		Работоспособная
II	0	3	3		Работоспособная
III	2	2	2		Работоспособная
IV	0	3	3		Работоспособная

произвольных сил.

2. Дан набор *CT*: −2; −1; 0; 1; 2.

3. Количество тел: 1; 2; 3; 4.

4. Вид опор, их сочетания и количество: жесткая заделка, шарнирно-неподвижная и шарнирно-подвижная.

5. Работоспособность конструкции: работоспособная и неработоспособная конструкции.

Решение.

1. Вид системы сил данной конструкции: плоская произвольная система сил, что отображено силами *P* и *Q*.

2. $CT=0$, так как количество неизвестных реакций опор и шарниров равно шести X_A, Y_A, X_B, Y_B, R_C, R_D и количество ЛНУР для двух тел AB и BD также равно шести:

- для балки AB: $\sum X=0$, $\sum Y=0$, $\sum m_A=0$;
- для балки BC: $\sum X=0$, $\sum Y=0$, $\sum m_C=0$.

Формула перехода от балки AB к балке BC:

$$\begin{cases} \overline{X_B}'=-\overline{X_B}, \\ \overline{Y_B}'=-\overline{Y_B}. \end{cases}$$

3. Конструкция состоит из двух тел.

4. Конструкция содержит одну шарнирно-неподвижную опору и две шарнирно-подвижные опоры.

5. Конструкция работоспособная, так как она находится в равновесии.

Результаты идентификации. Конструкция удовлетворяет следующим критериям: вид системы сил — плоская произвольная система сил; критерий $CT=0$; количество тел составной конструкции равно двум; вид опор и их количество — одна шарнирно-неподвижная опора и две шарнирно-подвижные опоры; данная конструкция работоспособная.

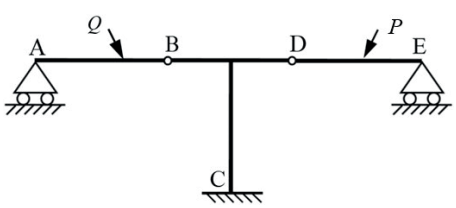


Рис.10. Схема составной конструкции

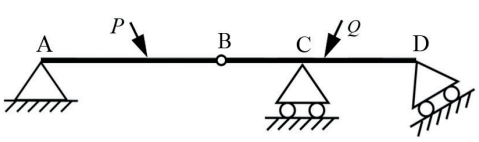


Рис.11. Схема двухэлементной составной конструкции

2.3.2. Многокритериальный выбор составной конструкции, состоящей из трех тел

Задача № 4. Описание алгоритма выбора критериев соответствующих схеме составной конструкции (*рис. 12*).

Предложенные критерии:

1. Вид системы сил: система сходящихся сил; плоская произвольная система сил; плоская система параллельных сил.

2. Дан набор *CT*: −2; −1; 0; 1; 2.

3. Количество тел: 1; 2; 3; 4.

4. Вид опор и их количество: жесткая заделка, шарнирно-неподвижная и шарнирно-подвижная.

5. Работоспособность конструкции: работоспособная и неработоспособная конструкции.

Решение.

1. Вид системы сил: плоская произвольная система сил. Это отображено силами *P* и *Q*.

2. $CT=0$, так как количество неизвестных реакций опор и шарниров равно девяти R_A, X_B, Y_B, X_C, Y_C, m_C, X_D, Y_D, R_E и количество линейно независимых уравнений равновесия для трех тел AB, BD и DE равно девяти.

3. Количество тел, входящих в конструкцию, равно трем.

4. Конструкция содержит одну

жесткую заделку и две шарнирно-подвижные опоры.

5. Конструкция работоспособная.

Результаты выбора. Конструкция удовлетворяет следующим критериям: вид системы сил — плоская произвольная система сил; критерий $CT=0$; количество тел составной конструкции равно трем; вид опор конструкции и их количество — одна жесткая заделка и две шарнирно-подвижные опоры.

III. Многокритериальная идентификация и многокритериальный выбор КСДТ

3.1. Основные определения и формулы КСДТ

Для решения новых задач идентификации и многокритериального выбора в КСДТ, необходимо использовать теорему Кориолиса и понятия: абсолютного, относительного и переносного движения точки, абсолютной скорости, абсолютного ускорения и их составляющих (*рис. 13*), где $\overline{r}=\overline{r}(t)$ — абсолютное движение точки М относительно неподвижной системы координат X_1, Y_1, Z_1 — относительное движение точки М относительно подвижной системы координат x, y, z, жестко связанной с движущимся телом; $\overline{\rho}=\overline{\rho}(t)$ — переносное движение той точки тела, совпадающей в данное мгновение с движущейся точкой М, относительно неподвижной системы координат X_1, Y_1, Z_1.

Следовательно, абсолютное движение точки М определяется векторной зависимостью $\overline{r}=\overline{\rho}+\overline{r_A}$.

Возьмем от этой зависимости первую и вторую полные производные по времени, при этом используем формулы Бура, Пуассона и правило круговой подстановки. В результате получим, что: абсолютная скорость точки М равна векторной сумме двух скоростей относительной $\overline{V_r}$ и переносной $\overline{V_e}$ — $\overline{V}=\overline{V_r}+\overline{V_e}$; абсолютное ускорение точки М равно векторной сумме трех ускорений — относительного $\overline{a_r}$, переносного $\overline{a_e}$ и ускорения Кориолиса $\overline{a_k}$ — $\overline{a}=\overline{a_r}+\overline{a_e}+\overline{a_k}$.

Если относительное движение точки ускоренное криволинейное, а переносное движение — ускоренное вращательное, то последняя формула абсолютного ускорения точки М приобретает вид:

$$\overline{a}=\overline{a_r^\tau}+\overline{a_r^n}+\overline{a_e^\tau}+\overline{a_e^n}+\overline{a_k} \qquad (1)$$

где $\overline{a}$ — абсолютное ускорение точки; $\overline{a_r^\tau}$ — относительное тангенциальное ускорение точки; $\overline{a_r^n}$ — относительное нормальное ускорение точки; $\overline{a_e^\tau}$ — переносное тангенциальное ускорение точки; $\overline{a_e^n}$ — переносное нормальное ускорение точки; $\overline{a_k}$ — ускорение Кориолиса.

Векторные слагаемые абсолютного ускорения в формуле (1) определяются из законов относительного и переносного движений. В работе рассматриваются только три вида переносного движения: поступательное прямолинейное, поступательное криволинейное и вращательное.

Из всего многообразия законов относительного и переносного движений в дальнейшем будут использованы только простейшие, имеющие вид:

$$S_r=B_1t^n, \qquad (2)$$

$$S_e=B_2t^m, \qquad (3)$$

$$\varphi_e=B_3t^m, \qquad (4)$$

где S_r — закон относительного прямолинейного или криволинейного движения; S_e — закон переносного поступательного прямолинейного движения; φ_e — закон переносного вращательного движения; B_1, B_2, B_3 — постоянные положительные коэффициенты; n и m — целые числа, принимают значения — 1 или 2; $t>0$.

Определим составляющие абсолютного ускорения точки в следующей последовательности:

1. Из выражения (2) найдем a_r^τ и a_r^n:

$$a_r^\tau=\ddot{S}_r=B_1n(n-1)t^{n-2}. \qquad (5)$$

Очевидно, что при показателе степени $n=1$, $a_r^\tau=0$ — движение равномерное (5).

Относительное нормальное ускорение:

$$a_r^n=\frac{V_r^2}{\rho_r}, \qquad (6)$$

где V_r — скорость относительного движения точки, ρ_r — радиус кривизны траектории точки в относительном движении.

Так как $V_r=\dot{S}_r=B_1nt^{n-1}$, то

$$a_r^n=\frac{B_1^2n^2t^{2(n-1)}}{\rho_r}. \qquad (7)$$

При прямолинейном относительном движении $a_r^n=0$, т.к. $\rho_r=\infty$ (7).

2. При определении составляющих переносного ускорения рассмотрим три случая:

2.1. Переносное движение поступательное прямолинейное. Из выражения (3) определим a_e^τ и a_e^n:

$$a_e^\tau=\ddot{S}_e=m(m-1)B_2t^{m-2}. \qquad (8)$$

При $m=1$, $a_e^\tau=0$ — переносное движение равномерное (8).

Нормальное ускорение при переносном прямолинейном движении a_e^n, т.к. $\rho_e=\infty$.

2.2. Переносное движение поступательное криволинейное. Из выражения (3) найдем a_e^τ и a_e^n:

$$a_e^\tau=\ddot{S}_e=B_2m(m-1)t^{m-2}.$$

Очевидно, что при показателе степени $m=1$, $a_e^\tau=0$ — движение равномерное.

Переносное нормальное ускорение — $a_e^n=\frac{V_e^2}{\rho_e}$, где V_e — скорость переносного движения точки, ρ_e — радиус кривизны траектории точки в переносном движении.

Так как $V_e=\dot{S}_e=B_2mt^{m-1}$, то

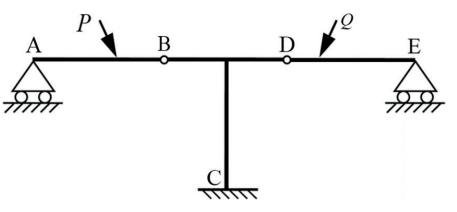


Рис.12. Схема трехэлементной составной конструкции

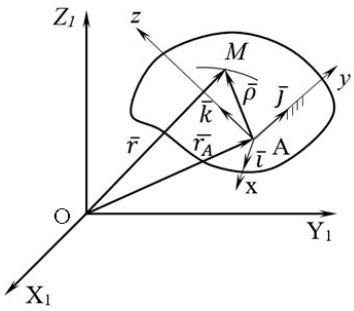


Рис.13. Схема сложного движения точки

$$a_e^n = \frac{B_2^2 m^2 t^{2(m-1)}}{\rho_e}$$

В случае переносного криволинейного движения $a_e^n \neq 0$.

2.3. Переносное движение вращательное. Из выражения (4) $\varphi_e = B_3 t^m$ определим a_e^τ и a_e^n:

$$a_e^\tau = \ddot{\varphi}_e r = \varepsilon_e r, \qquad (9)$$

где a_e^τ — переносное тангенциальное ускорение; r — радиус окружности, которую описывает точка во вращательном переносном движении; ε_e — угловое ускорение переносного вращения тела.

При $m = 1$, $a_e^\tau = 0$ переносное вращение — равномерное, т. к. $\varepsilon_e = 0$ (9).

Переносное нормальное ускорение определяется зависимостью

$$a_e^n = \omega_e^2 r\ , \qquad (10)$$

где ω_e — угловая скорость переносного вращения тела — $\omega_e = \dot{\varphi}_e m B_3 t^{\,m-1}$;

$$a_e^n = m^2 B_3^2 t^{\,2(m-1)} r. \qquad (11)$$

В случае переносного вращательного движения:

$$a_e^n \neq 0 \qquad (12)$$

Отметим, что критерию (12) соответствуют два вида переносного движения:

- *поступательное криволинейное;*
- *вращательное.*

3. Ускорение Кориолиса определяется векторной зависимостью

$$\overline{a}_k = 2\overline{\omega}_e \times \overline{V}_r. \qquad (13)$$

Если угол между векторами $\overline{\omega}_e$ и $\overline{V}_r$ обозначим α, тогда модуль ускорения Кориолиса (13) равен:

$$a_k = 2 \cdot \omega_e \cdot V_r \cdot \sin\alpha \qquad (14)$$

Ускорение Кориолиса (14) обращается в нуль, если хотя бы один из сомножителей ω_e, V_r, $\sin\alpha$ равен нулю.

Определим количество и вид вариантов критерия $\overline{a}$ — абсолютное ускорение точки, которые отличаются числом и видом векторных составляющих абсолютного ускорения $\overline{a_r^\tau}$, $\overline{a_r^n}$, $\overline{a_e^\tau}$, $\overline{a_e^n}$, $\overline{a_k}$. Для этого используем формулу (1) и простейшие законы относительного и переносного движений — (2), (3), (4). Полученные варианты критерия $\overline{a}$ разбиваем на пять групп.

Первая группа — пять критериев, каждый состоит из одной векторной составляющей абсолютного ускорения точки:

$$\overline{a} = 0, \quad \overline{a} = \overline{a_r^\tau}, \quad \overline{a} = \overline{a_r^n},$$

$$\overline{a} = \overline{a_e^\tau}, \quad \overline{a} = \overline{a_e^n}.$$

Вторая группа — семь критериев, каждый состоит из сочетания по два векторных слагаемых абсолютного ускорения точки:

$$\overline{a} = \overline{a_r^\tau} + \overline{a_r^n}, \quad \overline{a} = \overline{a_r^\tau} + \overline{a_e^\tau},$$

$$\overline{a} = \overline{a_r^\tau} + \overline{a_e^n}, \quad \overline{a} = \overline{a_r^n} + \overline{a_e^n},$$

$$\overline{a} = \overline{a_r^n} + \overline{a_e^\tau}, \quad \overline{a} = \overline{a_e^\tau} + \overline{a_e^n},$$

$$\overline{a} = \overline{a_e^n} + \overline{a_k}$$

Третья группа — семь критериев, каждый состоит из сочетания по три векторных слагаемых абсолютного ускорения точки:

$$\overline{a} = \overline{a_r^\tau} + \overline{a_r^n} + \overline{a_e^\tau}, \quad \overline{a} = \overline{a_r^\tau} + \overline{a_r^n} + \overline{a_e^n},$$

$$\overline{a} = \overline{a_r^\tau} + \overline{a_e^\tau} + \overline{a_e^n}, \quad \overline{a} = \overline{a_r^\tau} + \overline{a_e^n} + \overline{a_k},$$

$$\overline{a} = \overline{a_r^n} + \overline{a_e^\tau} + \overline{a_e^n}, \quad \overline{a} = \overline{a_r^n} + \overline{a_e^n} + \overline{a_k},$$

$$\overline{a} = \overline{a_e^\tau} + \overline{a_e^n} + \overline{a_k}.$$

Четвертая группа — четыре критерия, каждый состоит из сочетания по четыре векторных слагаемых абсолютного ускорения точки:

$$\overline{a} = \overline{a_r^\tau} + \overline{a_r^n} + \overline{a_e^\tau} + \overline{a_e^n},$$

$$\overline{a} = \overline{a_r^\tau} + \overline{a_r^n} + \overline{a_e^n} + \overline{a_k},$$

$$\overline{a} = \overline{a_r^\tau} + \overline{a_e^\tau} + \overline{a_e^n} + \overline{a_k},$$

Пятая группа — один критерий, содержащий пять векторных слагаемых абсолютного ускорения точки:

$$\overline{a} = \overline{a_r^\tau} + \overline{a_r^n} + \overline{a_e^\tau} + \overline{a_e^n} + \overline{a_k}.$$

3.2. Многокритериальная идентификация в КСДТ

Задача № 5. Описание алгоритма идентификации одной из четырех схем движения точки, изображенных на *рис. 14* по критериям — числу и виду векторных составляющих абсолютного ускорения точки $\overline{a_r^\tau}$, $\overline{a_r^n}$, $\overline{a_e^\tau}$, $\overline{a_e^n}$, $\overline{a_k}$ с данными *таблицы 4* [15].

Решение. Идентифицируем *таблицу 4* какой-либо одной из четырех схем:

Относительное движение r криволинейное, поэтому критерий $\overline{a_r^n} \neq 0$ ему соответствуют все четыре схемы.

Переносное движение e поступательное прямолинейное. Поэтому, критерии $\overline{a_e^n} = 0$ и $\overline{a_k} = 0$. Им соответствуют также все четыре схемы.

Так как $n = 1$, то критерий $\overline{a_r^\tau} = 0$. Показателю степени n из *таблицы 4* и критерию $\overline{a_r^\tau}$ соответствуют только схемы 1 и 3.

Так как $m = 1$, то критерий $\overline{a_e^\tau} = 0$. Показателю степени m из *таблицы 4* и критерию $\overline{a_e^\tau}$ соответствуют схемы 3 и 4.

Поскольку угол α не существует, то критерий $\overline{a_k} = 0$. Ему соответствуют все четыре схемы.

Результаты идентификации. Схема 3 по критериям — числу и виду векторных слагаемых абсолютного ускорения точки $\overline{a} = \overline{a_r^n}$ идентична данным *таблицы 4* — характеристикам простых движений.

Задача № 6. Описание алгоритма идентификации вариантов — А, Б, В, Г движений точки по многим критериям — виду характеристик простых движений r, e, S_r, φ_e, n, m, α (*таблица 5*) с заданными векторными слагаемыми абсолютного ускорения точки $\overline{a} = \overline{a_e^n} + \overline{a_k}$ [16].

Решение. Проанализируем заданную формулу абсолютного ускорения точки — $\overline{a} = \overline{a_e^n} + \overline{a_k}$:

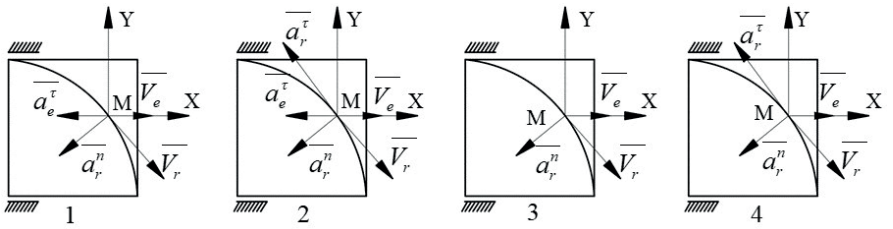


Рис.14. Схемы сложного движения точки

$\overline{a_r^\tau}=0$, следовательно, показатель степени $n=1$, этому критерию не соответствуют вариант А и Г;

$\overline{a_r^n}=0$, критерий относительное движение r — прямолинейное, что не соответствует варианту Б;

$\overline{a_e^\tau}=0$, критерий $m=1$, этому критерию не соответствуют варианты А и Г;

$\overline{a_e^n}\neq 0$, критерий переносное движение e — поступательное криволинейное или вращательное. Этому критерию соответствуют все четыре варианта — А, Б, В, Г;

$\overline{a_k}\neq 0$, критерий $\alpha\neq k\pi$, $k=0$; 1, этому критерию не соответствует вариант Б.

Результаты идентификации. Только вариант В идентичен всем критериям — характеристикам простых движений значению абсолютного ускорения точки — $\overline{a}=\overline{a_e^n}+\overline{a_k}$.

Задача № 7. Описание алгоритма идентификации вариантов — А, Б, В, Г движений точки по многим критериям — виду характеристик простых движений r, e, S_r, φ_e, n, m, α (*таблица 6*) с заданными векторными слагаемыми абсолютного ускорения точки $\overline{a}=\overline{a_r^\tau}+\overline{a_e^\tau}+\overline{a_e^n}$ [16].

Решение. Проанализируем заданную формулу абсолютного ускорения точки — $\overline{a}=\overline{a_r^\tau}+\overline{a_e^\tau}+\overline{a_e^n}$:

$a_r^\tau\neq 0$, следовательно, показатель степени $n=2$, этому критерию не соответствуют вариант А;

$\overline{a_r^n}=0$, критерий относительное движение r — прямолинейное, что не соответствует варианту В;

$\overline{a_e^\tau}\neq 0$, критерий $m=2$, этому критерию не соответствуют вариант А и В;

$\overline{a_e^n}\neq 0$, критерий переносное движение e — поступательное криволинейное либо вращательное. Этому критерию соответствуют все четыре варианта — А, Б, В, Г;

$\overline{a_k}=0$, ускорение Кориолиса обращается в нуль, если хотя бы один из сомножителей ω_e, V_r, $\sin\alpha$ равен 0. Следовательно, критерий $\alpha=k\pi$, $k=0$; 1 либо угол α не существует, так как ω_e или V_r равны нулю. Критерию α соответствуют два варианта — Б, Г.

Результаты идентификации. Варианты Б и Г идентичны всем критериям — характеристикам простых движений из *таблицы 6* заданным векторным слагаемым абсолютного ускорения точки $\overline{a}=\overline{a_r^\tau}+\overline{a_e^\tau}+\overline{a_e^n}$.

Задача № 8. Описание алгоритма идентификации вариантов движения точки А, Б, В, Г по многим критериям — характеристикам простых движений r, e, S_r, φ_e, n, m, α (*таблица 7*) со схемой на *рис. 15* [14].

Решение. Проанализируем схему сложного движения точки на *рис. 15*:

$\overline{a_r^\tau}\neq 0$ критерий — показатель степени $n=2$, этому критерию вариант А не соответствует;

$\overline{a_r^n}=0$ критерий — относительное движение прямолинейное, этому критерию не соответствует вариант Б;

$\overline{a_e^\tau}\neq 0$ критерий — $m=2$, этому критерию соответствуют варианты А и Г;

$\overline{a_e^n}\neq 0$ критерий — переносное движение поступательное криволинейное либо вращательное. Этому критерию соответствуют все варианты — А, Б, В, Г;

$\overline{a_k}\neq 0$ критерий — $\alpha\neq k\pi$, $k=0$; 1, этому критерию соответствует вариант В.

Результаты идентификации. Вариант В идентичен всем критериям — характеристикам простых движений r, e, S_r, φ_e, n, m, α (*таблица 7*) данной схеме сложного движения точки (*рис. 15*).

Задача № 9. Описание алгоритма идентификации одной из четырех схем движения точки, изображенных на *рис. 16*, по критериям — числу и виду векторных составляющих абсолютного ускорения точки $\overline{a_r^\tau}$, $\overline{a_r^n}$, $\overline{a_e^\tau}$, $\overline{a_e^n}$, $\overline{a_k}$ с данными *таблицы 8*.

Решение. Идентифицируем *таблицу 8* какой-либо одной из четырех схем:

Относительное движение r — криволинейное, поэтому критерий $\overline{a_r^n}\neq 0$ ему соответствуют все четыре схемы.

Переносное движение e — вращательное. Поэтому критерий $\overline{a_e^n}\neq 0$, ему соответствуют также все четыре схемы.

Так как $n=2$, то критерий $\overline{a_r^\tau}\neq 0$, по показателю степени n из *таблицы 5* и критерию $\overline{a_r^\tau}$ соответствуют только схемы 2 и 3.

Так как $m=2$, то критерий

Таблица 4. Характеристики простых движений

Виды движений	Законы движений	Показатели степени	Угол $\hat{\alpha}=(\overline{\omega_e},\overline{V_r})$
r — криволинейное; e — поступательное прямолинейное	$S_r=B_1t^n$ $S_e=-B_2t^m$	$n=1$ $m=1$	Не существует

Таблица 5. Варианты критериев – характеристики простых движений

	Вариант А	Вариант Б	Вариант В	Вариант Г
r	Прямолинейное	Криволинейное	Прямолинейное	Прямолинейное
e	Вращательное	Вращательное	Вращательное	Вращательное
S_r	$S_r=B_1t^n$	$S_r=B_1t^n$	$S_r=B_1t^n$	$S_r=B_1t^n$
φ_e	$\varphi_e=B_3t^m$	$\varphi_e=B_3t^m$	$\varphi_e=B_3t^m$	$\varphi_e=B_3t^m$
n	$n=2$	$n=1$	$n=1$	$n=2$
m	$m=3$	$m=1$	$m=1$	$m=2$
α	$\neq k\pi$, $k=0$; 1	$=k\pi$, $k=0$; 1	$\neq k\pi$, $k=0$; 1	$\neq k\pi$, $k=0$; 1

Таблица 6. Варианты критериев – характеристики простых движений

	Вариант А	Вариант Б	Вариант В	Вариант Г
r	Прямолинейное	Прямолинейное	Криволинейное	Прямолинейное
e	Вращательное	Поступ. криволинейное	Вращательное	Вращательное
S_r	$S_r=B_1t^n$	$S_r=B_1t^n$	$S_r=B_1t^n$	$S_r=B_1t^n$
φ_e; S_e	$\varphi_e=B_3t^m$	$S_e=-B_2t^m$	$\varphi_e=B_3t^m$	$\varphi_e=B_3t^m$
n	$n=1$	$n=2$	$n=2$	$n=2$
m	$m=1$	$m=2$	$m=1$	$m=2$
α	$\neq k\pi$, $k=0$; 1	Не существует	$\neq k\pi$, $k=0$; 1	$=k\pi$, $k=0$; 1

Таблица 7. Варианты критериев

	Вариант А	Вариант Б	Вариант В	Вариант Г
r	Прямолинейное	Криволинейное	Прямолинейное	Прямолинейное
e	Вращательное	Вращательное	Вращательное	Поступ. криволинейное
S_r	$S_r=B_1t^n$	$S_r=B_1t^n$	$S_r=B_1t^n$	$S_r=B_1t^n$
φ_e; S_e	$\varphi_e=B_3t^m$	$\varphi_e=B_3t^m$	$\varphi_e=B_3t^m$	$S_e=-B_2t^m$
n	$n=1$	$n=2$	$n=2$	$n=2$
m	$m=1$	$m=2$	$m=2$	$m=1$
α	$=k\pi$, $k=0$; 1	$=k\pi$, $k=0$; 1	$\neq k\pi$, $k=0$; 1	Не существует

$\overline{a_e^\tau}\neq 0$, по показателю степени m из *таблицы 5* и критерию $\overline{a_e^\tau}$ соответствуют схемы 1 и 2.

Поскольку угол $\alpha\neq k\pi$, $k=0$; 1, то критерий $\overline{a_k}\neq 0$ этому не соответствует схема 1.

Результаты идентификации. Данным *таблицы 8* — характеристикам простых движений r, e, S_r, φ_e, n, m, α идентична только схема 2 по критериям — числу и виду векторных слагаемых абсолютного ускорения точки $\overline{a}=\overline{a_r^\tau}+\overline{a_r^n}+\overline{a_e^\tau}+\overline{a_e^n}+\overline{a_k}$.

3.3. Многокритериальный выбор в КСДТ

Задача № 10. Описание алгоритма выбора векторных составляющих абсолютного ускорения точки $\overline{a_r^\tau}$, $\overline{a_r^n}$, $\overline{a_e^\tau}$, $\overline{a_e^n}$, $\overline{a_k}$, совершающей сложное движение, соответствующих заданным критериям — характеристикам простых движений r, e, S_r, φ_e, n, m, α, приведенным в *таблице 9*.

Решение. Проанализируем данные *таблицы 9*:

Критерий — относительное движение криволинейное, поэтому $\overline{a_r^n}\neq 0$;

Критерий — $n=1$, поэтому $\overline{a_r^\tau}=0$;

Критерии — переносное движение отсутствует, $m=0$, поэтому $\overline{a_e^n}=0$, $\overline{a_e^\tau}=0$;

Критерий — угол α — не существует, поэтому $\overline{a_k}=0$

Результат выбора. Абсолютное ускорение точки состоит из одного векторного слагаемого $\overline{a_r^n}$, т.е. $\overline{a}=\overline{a_r^n}$.

Задача № 11. Описание алгоритма выбора векторных составляющих абсолютного ускорения точки $\overline{a_r^\tau}$, $\overline{a_r^n}$, $\overline{a_e^\tau}$, $\overline{a_e^n}$, $\overline{a_k}$, совершающей сложное движение, соответствующих заданным критериям — характеристикам простых движений r, e, S_r, φ_e, n, m, α, приведенным в *таблице 10* [17].

Решение. Проанализируем данные *таблицы 10*:

Критерий — относительное движение прямолинейное, поэтому $\overline{a_r^n}=0$;

Критерий — $n=1$, поэтому $\overline{a_r^\tau}=0$;

Критерии — переносное дви-

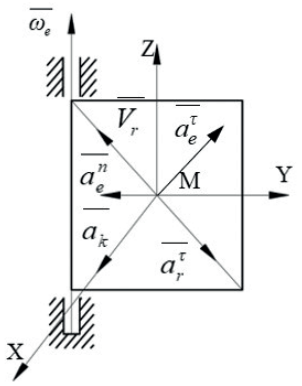


Рис.15. Схема сложного движения точки

жение вращательное, $m=1$, поэтому $\overline{a_e^n} \neq 0$, $\overline{a_e^\tau} \neq 0$;

Критерий — угол $\alpha \neq k\pi$, $k=0$; 1, поэтому $\overline{a_k} \neq 0$.

Ответ. Абсолютное ускорение точки состоит из суммы двух векторных слагаемых $\overline{a_e^n}$ и $\overline{a_k}$, каждое из которых не равно нулю — $\overline{a} = \overline{a_e^n} + \overline{a_k}$.

Задача № 12. Описание алгоритма выбора векторных составляющих абсолютного ускорения точки $\overline{a_r^\tau}$, $\overline{a_r^n}$, $\overline{a_e^\tau}$, $\overline{a_e^n}$, $\overline{a_k}$, совершающей сложное движение, соответствующих заданным критериям — характеристикам простых r, e, S_r, φ_e, n, m, α, приведенных в *таблице 11*.

Решение. Проанализируем данные *таблицы 11*:

Критерий — $n=2$, поэтому $\overline{a_r^\tau} \neq 0$;

Критерий — относительное движение криволинейное, поэтому $\overline{a_r^n} \neq 0$;

Критерии — переносное движение поступательное прямолинейное, $m=2$, поэтому $\overline{a_e^n} = 0$, $\overline{a_e^\tau} \neq 0$;

Критерий — угол α — не существует так как $\overline{\omega_e}$, поэтому $\overline{a_k} = 0$.

Результат выбора. Абсолютное ускорение точки состоит из суммы трех векторных слагаемых $\overline{a_r^\tau}$, $\overline{a_r^n}$ и $\overline{a_e^\tau}$, каждое из которых не равно нулю — $\overline{a} = \overline{a_r^\tau} + \overline{a_r^n} + \overline{a_e^\tau}$.

Задача № 13. Описание алгоритма выбора векторных составляющих абсолютного ускорения точки $\overline{a_r^\tau}$, $\overline{a_r^n}$, $\overline{a_e^\tau}$, $\overline{a_e^n}$, $\overline{a_k}$, совершающей сложное движение, соответствующих заданным критериям — характеристикам простых движений r, e, S_r, φ_e, n, m, α, приведенным в *таблице 12*.

Решение. Проанализируем данные *таблицы 12*:

Критерий — относительное движение криволинейное, поэтому $\overline{a_r^n} \neq 0$;

Критерий — $n=2$, поэтому $\overline{a_r^\tau} \neq 0$;

Критерии — переносное движение поступательное криволинейное, $m=2$, поэтому $\overline{a_e^n} \neq 0$, $\overline{a_e^\tau} \neq 0$;

Критерий — угол α — не существует так как $\overline{\omega_e} = 0$, поэтому $\overline{a_k} = 0$.

Результат выбора. Абсолютное ускорение точки состоит из суммы четырех векторных слагаемых $\overline{a_r^\tau}$, $\overline{a_r^n}$, $\overline{a_e^\tau}$ и $\overline{a_e^n}$, каждое из которых не равно нулю — $\overline{a} = \overline{a_r^\tau} + \overline{a_r^n} + \overline{a_e^\tau} + \overline{a_e^n}$.

Задача № 14. Описание алгоритма выбора векторных абсолютного ускорения точки $\overline{a_r^\tau}$, $\overline{a_r^n}$, $\overline{a_e^\tau}$, $\overline{a_e^n}$, $\overline{a_k}$, совершающей сложное движение, соответствующих заданным критериям — характеристикам простых движений r, e, S_r, φ_e, n, m, α приведенным в *таблице 13*.

Решение. Проанализируем данные *таблицы 13*:

Критерий — относительное движение прямолинейное, поэтому $\overline{a_r^n} \neq 0$;

Критерий — $n=2$, поэтому $\overline{a_r^\tau} \neq 0$;

Критерии — переносное движение вращательное, $m=2$, поэтому $\overline{a_e^n} \neq 0$, $\overline{a_e^\tau} \neq 0$;

Критерий — угол $\alpha \neq k\pi$, $k=0$; 1, поэтому $\overline{a_k} \neq 0$.

Результат выбора. Абсолютное ускорение точки состоит из суммы всех пяти векторных слагаемых $\overline{a_r^\tau}$, $\overline{a_r^n}$, $\overline{a_e^\tau}$, $\overline{a_e^n}$ и $\overline{a_k}$, каждое из которых не равно нулю — $\overline{a} = \overline{a_r^\tau} + \overline{a_r^n} + \overline{a_e^\tau} + \overline{a_e^n} + \overline{a_k}$.

Заключение

1. Чтобы сократить разрыв между современными методами проектирования машин и их узлов в виде расчетно-методических многокритериальных аппаратов — РММА и знаниями, получаемыми студентами в учреждениях высшего образования, необходимо уже сейчас на лекциях и на практических занятиях реализовывать шесть задач статики и пять задач КСДТ:

Задачи статики:

- *Задача о приведении системы сил.*
- *Задача о равновесии системы сил.*
- *Задача о рациональном решении статики составных конструкций.*
- *Задача о многокритериальной идентификации статики составных конструкций.*
- *Задача о многокритериальном выборе статики составных конструкций.*
- *Синтез статики простых и составных конструкций различной сложности.*

Задачи кинематики:

- *Задача — по заданному относительному движению точки и движению подвижной системы определить сложное движение.*
- *Задача — заданное сложное движение разложить на составляющие движения.*

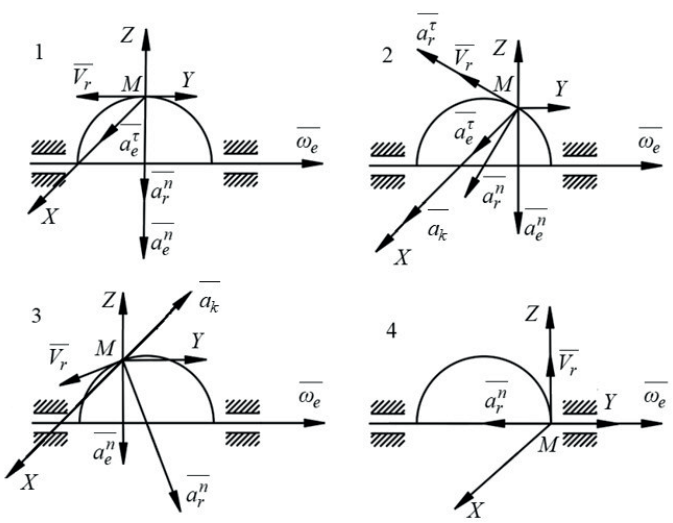


Рис.16. Схема кинематики сложного движения точки

Таблица 8. Характеристики простых движений

Виды движений	Законы движений	Показатели степени	Угол $\hat{\alpha}=(\overline{\omega_e},\overline{V_r})$
r — криволинейное; e — вращательное	$S_r=B_1t^n$ $\varphi_e=B_3t^m$	$n=2$ $m=2$	$\neq k\pi$, $k=0;\ 1$

Таблица 9. Критерии выбора – характеристики простых движений точки

Виды движений	Законы движений	Показатели степени	Угол $\hat{\alpha}=(\overline{\omega_e},\overline{V_r})$
r — криволинейное; e — отсутствует	$S_r=B_1t^n$ $\varphi_e=B_3t^m$	$n=1$ $m=0$	Не существует

Таблица 10. Критерии выбора – характеристики простых движений точки

Виды движений	Законы движений	Показатели степени	Угол $\hat{\alpha}=(\overline{\omega_e},\overline{V_r})$
r — прямолинейное; e — вращательное	$S_r=B_1t^n$ $\varphi_e=B_3t^m$	$n=1$ $m=1$	$\neq k\pi$, $k=0;\ 1$

Таблица 11. Критерии выбора – характеристики простых движений точки

Виды движений	Законы движений	Показатели степени	Угол $\hat{\alpha}=(\overline{\omega_e},\overline{V_r})$
r — криволинейное; e — поступательное прямолинейное	$S_r=B_1t^n$ $S_e=-B_2t^m$	$n=2$ $m=2$	Не существует

Таблица 12. Критерии выбора – характеристики простых движений точки

Виды движений	Законы движений	Показатели степени	Угол $\hat{\alpha}=(\overline{\omega_e},\overline{V_r})$
r — криволинейное; e — поступательное криволинейное	$S_r=B_1t^n$ $S_e=-B_2t^m$	$n=2$ $m=2$	Не существует

Таблица 13. Критерии выбора – характеристики простых движений точки

Виды движений	Законы движений	Показатели степени	Угол $\hat{\alpha}=(\overline{\omega_e},\overline{V_r})$
r — криволинейное; e — вращательное	$S_r=B_1t^n$ $\varphi_e=B_3t^m$	$n=2$ $m=2$	$\neq k\pi$, $k=0;\ 1$

- *Задача о многокритериальной идентификации КСДТ.*
- *Задача о многокритериальном выборе КСДТ.*
- *Синтез КСДТ.*

2. Применение критерия — вид системы сил при движении по балке сначала «**Слева – направо**», а затем «**Справа – налево**» позволяет минимизировать количество вычислительных процедур или действий при определении составляющих реакций опор различных конструкций многоэлементных балок.

3. Метод рационального решения позволяет из множества существующих вариантов решения задач статики составных конструкций выбрать оптимальное решение по критерию — минимум вычислительных процедур или действий.

4. Применение метода рационального решения задач ССК позволило минимизировать количество вычислительных процедур или действий при решении систем алгебраических линейно независимых уравнений равновесия каждой из шести систем сил и при определении составляющих реакций опор различных конструкций многоэлементных составных балок:

- *двухэлементной статически определимой балки* — «*СТ* — 20»;
- *трехэлементных статически определимых балок* — «*СТ* — 130», «*СТ* — 022», «*СТ* — 040», «*СТ* — 211», «*СТ* — 121», «*СТ* — 211» (*рис. 2*).

5. Методы многокритериальной идентификации и многокритериального выбора реализованы в КСДТ при решении десяти различных по сложности задач.

6. При решении задач КСДТ с использованием критериев:

$$\overline{a} = \overline{a_e^n},\ \overline{a} = \overline{a_r^\tau} + \overline{a_e^n},$$

$$\overline{a} = \overline{a_r^n} + \overline{a_e^n},\ \overline{a} = \overline{a_e^\tau} + \overline{a_e^n},$$

$$\overline{a} = \overline{a_r^\tau} + \overline{a_r^n} + \overline{a_e^n},\ \overline{a} = \overline{a_r^\tau} + \overline{a_e^\tau} + \overline{a_e^n},$$

$$\overline{a} = \overline{a_r^n} + \overline{a_e^\tau} + \overline{a_e^n},\ \overline{a} = \overline{a_r^\tau} + \overline{a_r^n} + \overline{a_e^\tau} + \overline{a_e^n}$$

возможно раздвоение переносного движения на два движения: поступательное криволинейное и вращательное.

7. Методы рационального решения, многокритериальной идентификации и многокритериального выбора реализованы на примерах решения задач различных по сложности статически определимых составных конструкций и на задачах КСДТ. Студенты, решая эти задачи, приобретают новые знания и навыки многокритериального мышления, идентификации и выбора, которые помогут им в дальнейшей учебе и в будущей трудовой деятельности при: модернизации существующих машин; проектировании и создании новых технологических процессов и перспективных моделей техники.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гурвич, Ю. А. Оптимизация параметров управляемой оси автобусов и автомобилей «МАЗ» / Ю. А. Гурвич // Теоретическая и прикладная механика. – 2010. – № 25. – С. 189-203.
2. Гурвич, Ю. А. Обоснование методики и программного продукта многокритериальной оптимизации параметров различных конструкций рулевых трапеций семейства грузовых автомобилей / Ю. А. Гурвич // Машиностроение: респ. межведомств. сб. науч. тр. – Минск: БНТУ, 2018. – Вып. 31. – С. 153-167.
3. Гурвич, Ю. А. Многокритериальное проектирование управляемых неразрезных осей грузовых автомобилей / Ю. А. Гурвич // Сборник научных статей военной академии Республики Беларусь. – 2018. – № 35. – С. 72-80.
4. Гурвич, Ю. А. Экспериментально-аналитический метод параметрической идентификации процесса качения колеса с шиной / Ю. А. Гурвич // Авиационный вестник. – 2021. – № 5. – С. 29-44.
5. Гурвич, Ю. А. Новые прикладные критерии колебательной и апериодической устойчивости движения колес транспортных средств. Актуальные проблемы динамики и прочности в теоретической и прикладной механике / Ю. А. Гурвич. – Минск: УП «Технопринт», 2001. – 551 с.
6. Гурвич, Ю. А. Прикладные критерии устойчивости движения управляемых колес транспортных средств / Ю. А. Гурвич, Ю. Д. Сырокваш // Автомобильная промышленность. – 2005. – № 9. – С. 23-7.
7. Гурвич, Ю. А. Семейство новых прикладных критериев колебательной устойчивости-неустойчивости движения / Ю. А. Гурвич // Теоретическая и прикладная механика. – 2010. – № 25. – С. 306-308.
8. Гурвич, Ю. А. Выбор критерия оптимизации параметров транспортных средств с помощью метода сеток / Ю. А. Гурвич // Машиностроение: респ. межведомств. сб. науч. тр. – Минск: БНТУ, 2018. – Вып. 31. – С. 137-147.
9. Бутенин, Н. В. Курс теоретической механики / Н. В. Бутенин, Я. Л. Лунц, Д. Р. Меркин. – М.: Наука, 1970. – Том I. Статика и кинематика. – 240 с.
10. Применение многокритериальной идентификации в статике двух тел / О. С. Порожнюк и др. // Динамика по времени науки – 2021: мат. XVII Интернационал. Научно-практическая конференция, София, 17 – 25 июля 2021 года: София, 2021. – Т. 3. – С. 47-50.
11. Применение многокритериальной идентификации в статике трех тел / О. С. Порожнюк и др. // Illustratané vědecké novinky – 2021: materiály XVIII Mezinárodní vědecko – praktická konference, Praha, 22 – 30 červnců 2021. – Прага: Издательство «Образование и наука», 2021. – Т. 2 – С. 114-118.
12. Порожнюк, О. С. Применение однокритериального выбора в статике составных конструкций / О. С. Порожнюк, А. Ю. Демко, Ю. А. Гурвич // Prospects of world science – 2021: materials of the XVII International scientific and practical Conference, Sheffield, July 30 – August 7 2021. Sheffield: Science and Education LTD., 2021. – V. 3. – P. 102-105.
13. Порожнюк, О. С. Применение многокритериального выбора в статике составных конструкций / О. С. Порожнюк, А. Ю. Демко, Ю. А. Гурвич // Nauka: teoria i praktyka – 2021: materiały XVII Międzynarodowej naukowi-praktycznej konferencji, Przemyśl, 07 – 15 sierpnia 2021. – Przemyśl, 2021. – T. 2. – P. 56-63.
14. Демко, А. Ю. Применение методов многокритериальной идентификации и выбора в теоретической и прикладной механике / А. Ю. Демко, О. С. Порожнюк, Ю. А. Гурвич // Nauka: teoria i praktyka – 2021: materiały XVII Międzynarodowej naukowi-praktycznej konferencji, Przemyśl, 07 – 15 sierpnia 2021. – Przemyśl, 2021. – T. 2. – P. 63-66.
15. Задачи идентификации в кинематике сложного движения точки / А. Ю. Демко и др. // Динамиката на съвременната наука – 2021 : мат. XVII междунар. научна практична конф., София, 17 – 25 юли 2021 г.: София, 2021. – V.3. – С. 50-53.
16. Демко, А. Ю. Задачи многокритериальной идентификации в кинематике сложного движения точки / А. Ю. Демко, О. С. Порожнюк, Ю. А. Гурвич // Prospects of world science – 2021: materials of the XVII International scientific and practical Conference, Sheffield, July 30 – August 7 2021. Sheffield: Science and Education LTD., 2021. – V.3. – P. 99-102.

17. Задачи выбора в кинематике сложного движения точки / А. Ю. Демко и др. // Aplikované vědecké novinky – 2021: materiály XVIII Mezinárodní vědecko - praktická konference, Praha, 22 - 30 červnců 2021. – Praha: Publishing House «Education and Science», 2021. – V.2 – P. 118-120.

REFERENCES

1. Gurvich, Y. A. Optimization of the parameters of the controlled axis of buses and cars "MAZ" / Y. A. Gurvich // Theoretical and applied mechanics. – 2010. – № 25. – P. 189-203.
2. Gurvich, Y. A. Substantiation of the methodology and the program product of the multi-criteria optimization of the parameters of various designs of the steering trapezoids of the truck family / Y. A. Gurvich // Mashinostroenie: rep. interdepartmental. sb. nauch. Tr. – Minsk: BNTU, 2018. – № 31. – P. 153-167.
3. Gurvich, Y. A. Multi-kriterial'naya klassiya plaimatel'nykh neraznykh osei gruzhnykh avgestvo / Y. A. Gurvich // Sbornik nauchnykh articles voennogo akademii Respubliki Belarus. – 2018. – № 35. – P. 72-80.
4. Gurvich, Y. A. Experimental-analytical method of parametric identification of the process of rolling the wheel with a tire / Y. A. Gurvich // Aviatsionnyi vestnik. – 2021. – № 5. – P. 29-44.
5. Gurvich, Y. A. New applied criteria of oscillatory and aperiodic stability of the movement of the wheels of vehicles. Actual problems of dynamics and strength in theoretical and applied mechanics / Y. A. Gurvich. – Minsk: UE "Technoprint", 2001. – 551 p.
6. Gurvich, Y. A. Applied criteria for the stability of the movement of controlled wheels of vehicles / Y. A. Gurvich, Y. D. Syrokvash // Automobile industry. – 2005. – № 9. – P. 23-27.
7. Gurvich, Y. A. Semey novoye applied'noi criteria osobennoi stoyannoi stoyanstva-eksaturnosti proizvodstva / Y. A. Gurvich // Teoreticheskaya i pri appliednaya mekhanika. – 2010. – № 25. – P. 306-308.
8. Gurvich, Y. A. Vybor dekatrovanie rekotivsii avtomatsii avtomobil'nykh sotsial'nogo netoky / Y. A. Gurvich // Mashinostroenie: rep. interdepartmental. sb. nauch. Tr. – Minsk: BNTU, 2018. – № 31. – P. 137-147.
9. Butenin, N. V. Kurs teoreticheskoi mekhanika. / N. V. Butenin, Y. L. Lunz, D. R. Merkin. – M.: Nauka, 1970. – T. I. Statics and Kinematics. – 240 p.
10. Application of multi-criteria identification in the statics of two bodies / O. S. Porozhnyuk et al. // Dynamics by time of science – 2021: mat. XVII International. Scientific and Practical Conference, Sofia, July 17 – 25, 2021: Sofia, 2021. – T. 3. – P. 47-50.
11. Application of multi-criteria identification in the statics of three bodies / O. S. Porozhnyuk et al. // Illustratané vědecké novinky – 2021: materiály XVIII Mezinárodní vědecko – praktická konference, Praha, 22 – 30 červnců 2021. – Prague: Education and Science Publishing House, 2021. – T. 2 – P. 114-118.
12. Porozhnyuk, O. S. Application of single-criteria selection in statics of composite constructions / O. S. Porozhnyuk, A. Y. Demko, Y. A. Gurvich // Perspectives of the World Science – 2021: Materials of the XVII International Scientific and Practical Conference, Sheffield, July 30 – August 7, 2021. Sheffield: Science and Education LTD., 2021. – T. 3. – P. 102-105.
13. Porozhnyuk, O. S. Application of multi-criteria selection in statics of composite constructions / O. S. Porozhnyuk, A. Y. Demko, Y. A. Gurvich // Nauka: teoria i praktyka – 2021: materiały XVII Międzynarodowej naukowi-praktycznej konferencji, Przemyśl, 07 – 15 sierpnia 2021. – Przemyśl, 2021. – T. 2. – P. 56-63.
14. Demko, A. Y. Application of methods of multi-criteria identification and choice in theoretical and applied mechanics / A. Y. Demko, O. S. Porozhnyuk, Y. A. Gurvich // Nauka: teoria i praktyka – 2021: materiały XVII Międzynarodowej naukowi-praktycznej konferencji, Przemyśl, 07 – 15 sierpnia 2021. – Przemyśl, 2021. – T. 2. – P. 63-66.
15. Problems of identification in the kinematics of complex movement of the point / A. Y. Demko et al. // Dynamics on timemennata nauka – 2021 : mat. XVII International. Scientific Practical Conf., Sofia, 17 – 25 Jul 2021: Sofia, 2021. – V.3. – P. 50-53.
16. Demko, A. Y. Problems of multi-criteria identification in the kinematics of complex movement of the point / A. Y. Demko, O. S. Porozhnyuk, Y. A. Gurvich // Prospects of world science – 2021: materials of the XVII International scientific and practical Conference, Sheffield, July 30 – August 7 2021. Sheffield: Science and Education LTD., 2021. – V.3. – P. 99-102.
17. Problems of selection in kinematics of complex motion of a point / A. Y. Demko et al. // Flipikované vědecké novinky – 2021: materiály XVIII Mezinárodní vědecko - praktická konference, Praha, 22 – 30 červnců 2021. – Praha: Publishing House «Education and Science», 2021. – V.2 – P. 118-120.

Статья поступила в редакцию
10.11.2021

УДК 623.4

В.П. ТУЗЛУКОВ, В.А. КРАСКОВСКИЙ

СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ СОПРОВОЖДЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

Вячеслав Петрович Тузлуков *– кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой технической эксплуатации авиационного и радиоэлектронного оборудования учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь*
slava.tuzlukov@mail.ru

Tuzlukov Vyacheslav *– Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of Department of Technical Maintenance of Aviation and Radio Electronic Hardware of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus*
slava.tuzlukov@mail.ru

Вадим Александрович Красковский *– магистр технических наук, старший преподаватель кафедры технической эксплуатации авиационного и радиоэлектронного оборудования учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь*
vadim_kraskovskii@mail.ru

Vadim Kraskovsky *– Master of Technical Sciences, Senior Lecturer of Department of Technical Maintenance of Aviation and Radio Electronic Hardware of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus*
vadim_kraskovskii@mail.ru

Аннотация: *в настоящей работе рассматриваются требования, предъявляемые к системам сопровождения объектов. Рассмотрены возможные пути повышения эффективности систем сопровождения. Проанализированы преимущества и недостатки существующих алгоритмов сопровождения объектов. Произведен анализ результатов исследований в области проектирования современных систем сопровождения объектов, на основании которого даны рекомендации по реализации основных этапов многоцелевого сопровождения объектов, в том числе по выбору фильтра сопровождения.*
Ключевые слова: *система сопровождения объектов, активная фазированная решетка, обработка сигналов, фильтр Калмана.*

Abstract: *this paper deals with the functional requirements to moving target indication and tracking systems. The possible ways to increase an efficiency of moving target indication and tracking systems functioning are discussed. Signal processing algorithms employed by these systems are investigated.*
Keywords: *moving target indication and tracking systems, active phased array, signal processing, Kalman filter.*

С каждым годом интенсивность движения на воздушном транспорте возрастает. При этом количество подвижных объектов в районе аэропорта увеличивается. Для обеспечения безопасности полетов необходимо непрерывно с высокой точностью отслеживать перемещения всех наземных и воздушных объектов. Именно с этой целью в авиации применяются системы сопровождения объектов. При этом выполняется обнаружение и сопровождение одновременно нескольких объектов в процессе обзора требуемого участка пространства.

Одним из немногих направлений совершенствования систем сопровождения объектов различного базирования, позволяющего одновременно улучшить показатели их эффективности и информативности (обнаружения, точности, помехозащищенности и т. д.), является использование нескольких диапазонов излучения [1].

Повышение информативности, в первую очередь, обеспечивается за счет того, что отраженные от обнаруживаемого объекта сигналы будут иметь различные значения параметров в зависимости от частоты сигнала, облучающего объект. Несмотря на это преимущество перед одночастотными системами сопровождения объектов, многочастотные системы сопровождения имеют ряд недостатков. При использовании нескольких частотных диапазонов сложнее обеспечить электромагнитную совместимость, усложняются антенная система и алгоритмы комплексной обработки сигналов различных частотных диапазонов.

В первую очередь, возникающие сложности связаны с необходимостью построения более сложной матрицы взаимовлияния различных радиоэлектронных систем друг на друга для всех используемых диапазонов с учетом взаимного расположения их антенн. При этом значительно усложняется процедура согласованного управления диапазонами частот во временной, частотной и пространственной областях.

Выбор типа антенной системы оказывает существенное влияние не только на электромагнитную совместимость, но и на режимы обзора пространства и процедуры совместной обработки сигналов. Стоит отметить, что современная система сопровождения объектов

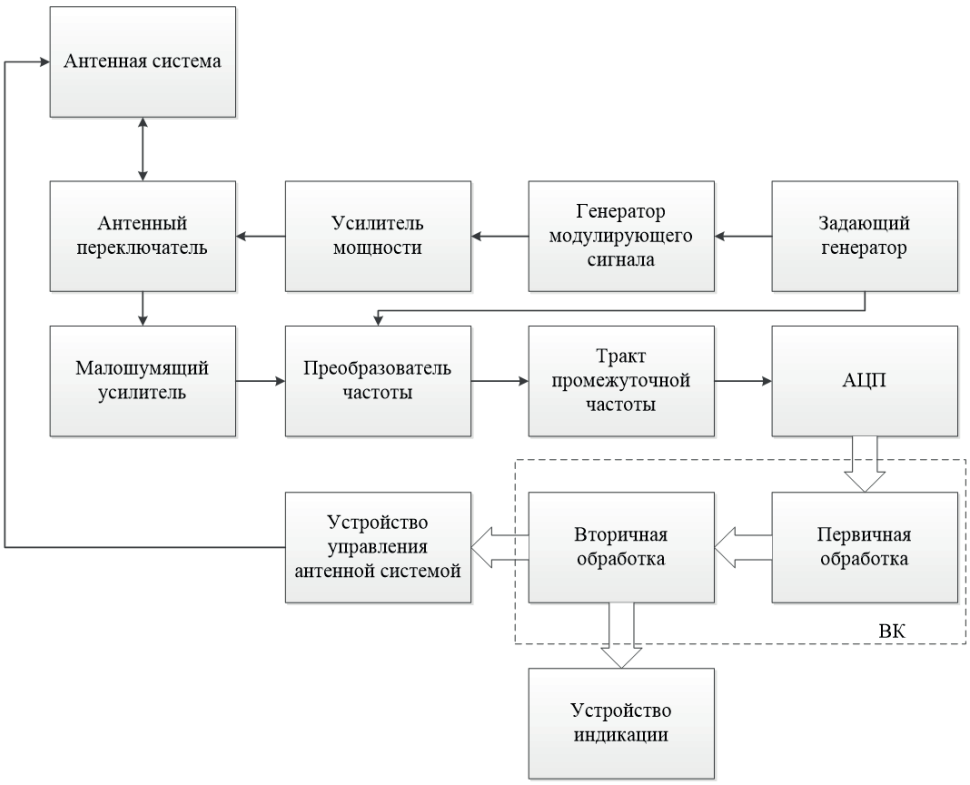


Рис.1. Структурная схема современной системы сопровождения объектов: АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ВК – вычислительный комплекс

должна не только обеспечивать захват и сопровождение объекта, но и предварительно обнаруживать его в достаточно большом объеме пространства. Для этого наилучшим образом в качестве антенной системы подойдет активная фазированная антенная решетка.

При использовании нескольких диапазонов частот усложняются правила их интеграции в единую информационно-управляющую систему, поскольку приходится использовать более сложные алгоритмы комплексной обработки. Требуется также их программное и аппаратурное объединение.

Особенности комплексирования, выполняемого при первичной и вторичной обработке, предопределяют необходимость проведения отождествления измерений не только по наблюдаемым объектам, но и по диапазонам частот.

Особенно требовательным к выполнению этих операций является режим многоцелевого сопровождения, являющийся основным информационным режимом работы современных систем сопровождения объектов [1—3]. Поэтому разработка оптимальных алгоритмов первичной и вторичной обработки сигналов на фоне помех при многоцелевом сопровождении объектов является актуальным направлением развития в рассматриваемой области.

Анализ систем сопровождения объектов

Одновременное сопровождение большого числа объектов широко используется не только в бортовых системах воздушных судов, но и в наземных автоматических системах управления воздушным движением. Этот режим позволяет непрерывно получать информацию о всех объектах в зоне ответственности, выявлять наиболее важные (опасные) объекты и сопровождать их.

Структурная схема современной системы сопровождения объектов представлена на *рис. 1.*

Режим многоцелевого сопровождения может быть реализован как в системах сопровождения с механическим перемещением луча, так и в системах сопровождения с электронным сканированием луча (радиолокационные системы с фазированной антенной решеткой, с активной фазированной антенной решеткой).

Антенная система отвечает за формирование диаграммы направленности, количество одновременно сопровождаемых объектов, а также обеспечивает излучение зондирующего сигнала и прием сигнала, отраженного от обнаруживаемого объекта.

Радиопередающий тракт состоит из задающего генератора, генератора модулирующего сигнала и усилителя мощности. Этот тракт отвечает за формирование зондирующих сигналов с заданными параметрами, которые обеспечат требуемые разрешающие способности по скорости и дальности, а также заданную выходную мощность тракта.

Радиоприемный тракт вклю-

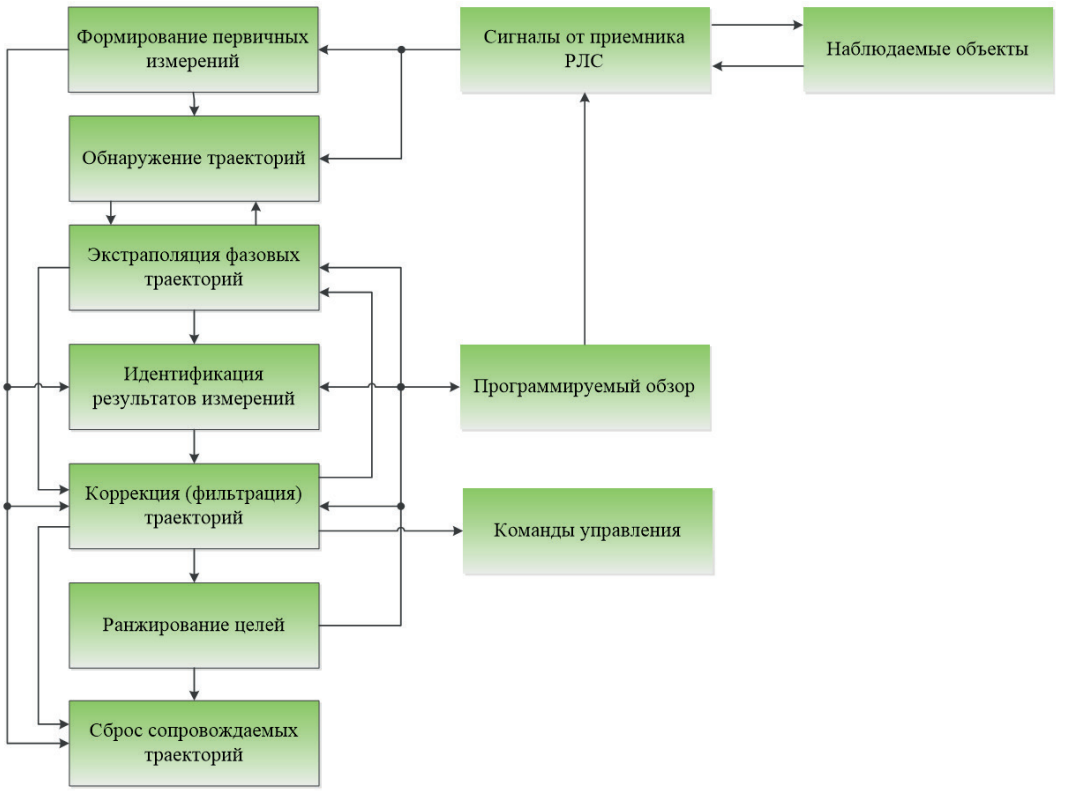


Рис.2. Этапы многоцелевого сопровождения воздушных объектов

чает в себя малошумящий усилитель, преобразователь частоты и тракт промежуточной частоты. Радиоприемный тракт отвечает за предварительную частотную селекцию и усиление принимаемых сигналов, а также обеспечивает понижение частоты принимаемых сигналов.

Далее, принятые сигналы с помощью аналого-цифрового преобразователя преобразуются в цифровую форму и поступают в вычислительный комплекс, где подвергаются обработке: первичной и вторичной. Первичная обработка радиолокационной информации заключается в обнаружении объектов и измерении их координат.

Режим многоцелевого сопровождения реализуется, главным образом, в процессе вторичной обработки радиолокационной информации, которая осуществляет обнаружение траекторий объектов, сопровождение объектов и траекторный расчет в интересах потребителей радиолокационной информации.

Точность результатов вторичной обработки радиолокационной информации, помимо всего прочего, непосредственно зависит от качественных характеристик алгоритма первичной обработки. Поэтому при проектировании современной системы сопровождения объектов важно обеспечить максимальную вероятность правильного обнаружения объектов и точность определения их координат.

Следует отметить, что вопросы многоцелевого сопровождения достаточно широко представлены в литературе [3]. При этом можно встретить и такие определения многоцелевого сопровождения, как режим автоматического сопровождения объектов при обзоре пространства, режим сопровождения на проходе [2], режим траекторного сопровождения объектов. Вместе с тем, рассмотрение режимов многоцелевого сопровождения проводится, в большинстве случаев, применительно к наземным радиолокационным системам, осуществляющим мониторинг воздушного пространства.

При построении современной системы сопровождения воздушных объектов следует учитывать назначение проектируемой системы и условия эксплуатации для предъявления к ней корректных требований. Отталкиваясь от назначения и условий эксплуатации системы, определяют технические характеристики автоматического сопровождения объектов в режиме обзора. Основными техническими характеристиками являются: длина волны излучаемых колебаний; форма излучаемого сигнала; длительность и частота повторения импульсов; средняя и импульсная мощность излучения; форма и ширина диаграммы направленности антенны в горизонтальной и вертикальной плоскости; метод обзора зоны; эффективная площадь и коэффициент усиления антенны; чувствительность приемного устройства; ширина полосы пропускания приемника; коэффициент шума приемника; габаритные размеры и масса системы автоматического сопровождения целей в режиме обзора.

Исходя из требований целевого назначения систем автоматического сопровождения воздушных объектов и условий их функционирования, для типовых систем автоматического сопровождения объектов в режиме обзора можно выделить 7 этапов при обнаружении и сопровождении воздушных объектов:

Этап 1. Формирование первичных измерений.

Этап 2. Обнаружение траекторий.

Этап 3. Экстраполяция относительных координат состояния (траекторий) всех сопровождаемых объектов в промежутках между поступлениями от радиолокационной системы результатов измерений.

Этап 4. Идентификация поступающих результатов измерений на принадлежность тем или иным экстраполируемым траекториям.

Этап 5. Коррекция или фильтрация той или иной экстраполируемой траектории по результатам идентифицированных измерений.

Этап 6. Ранжирование объектов по степени их важности или опасности.

Этап 7. Сброс сопровождаемых траекторий.

Функциональные связи между этапами представлены на *рис. 2.*

Формирование первичных измерений включает в себя все этапы первичной обработки радиосигналов, начиная от их обнаружения и заканчивая получением отсчетов дальности, скорости и угловых координат в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Необходимо отметить, что результаты непосредственных и высокоточных измерений скорости можно получить только при использовании в радиолокационной системе импульсных сигналов с высокой и средней частотой повторения импульсов [1 – 3].

В настоящее время существуют различные устройства первичной обработки сигналов: корреляционные, энергетические, фильтровые, корреляционно-фильтровые и обобщенные обнаружители сигналов. Выбор того или иного устройства первичной обработки сигналов в первую очередь определяется наличием или отсутствием априорной информации об обнаруживаемом сигнале. Так, корреляционный обнаружитель сигналов является оптимальным при наличии априорной информации об обнаруживаемом сигнале. Энергетический обнаружитель будет оптимальным при отсутствии этой информации.

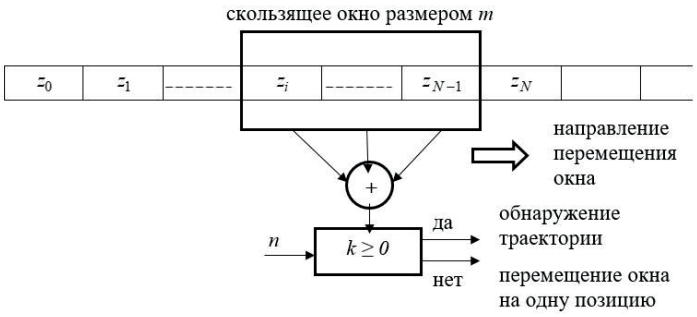


Рис.3. Схема реализации метода скользящего окна

Обобщенный же обнаружитель можно считать оптимальным приемным устройством как при наличии, так и при отсутствии априорных данных об обнаруживаемом сигнале и его параметрах, так как данный обнаружитель содержит в своем составе корреляционный и автокорреляционный каналы.

От вероятности правильного обнаружения объекта и точности измерения его координат зависят результаты последующих этапов сопровождения воздушных объектов. Поэтому, одной из важнейших задач, которая ставится при проектировании современных систем автоматического сопровождения объектов в режиме обзора, является разработка помехозащищенного алгоритма первичной обработки сигналов.

Второй этап сопровождения (обнаружение траектории) заключается в принятии решения о взятии на сопровождение нового объекта, появившегося в зоне обзора радиолокационной системы. Обнаружение новой траектории осуществляется по результатам измерений дальности, скорости, угловых координат обнаруженных объектов после проверки их принадлежности всем сопровождаемым траекториям. Измерения, принадлежность которых к одной из траектории установлена, поступают в соответствующий фильтр сопровождения, а по оставшимся отметкам выдается признак обнаружения новой траектории. Если объект обнаруживается n раз в m циклах обзора ($n \leq m$), то принимается решение о наличии нового объекта и взятии его на сопровождение. Данный критерий обнаружения траектории объекта называют критерием n/m.

Так как отметки могут возникнуть как от нового объекта, так и из-за влияния шума, ложных отражений или помех, то требуется иметь подтверждение того, что в зоне обзора действительно появился новый объект. Таким образом, процедура обнаружения траектории связана с решением задачи обнаружения объекта, который впоследствии необходимо поставить на сопровождение.

В настоящее время существует два основных метода обнаружения траектории: метод скользящего окна и метод последовательных испытаний.

Метод скользящего окна применяется обычно в радиолокационных системах с механическим сканированием антенны, когда антенна последовательно сканирует зону обзора с заданным периодом обзора $T_{обз.}$ Решение об обнаружении новой траектории принимается на основе анализа информации, полученной за несколько периодов обзора. Суть метода скользящего окна по критерию n/m заключается в следующем (*рис. 3*).

Последовательность $\{z_0, z_1, z_2, \ldots, z_N\}$ представляет собой результаты предварительной обработки отраженных от объекта сигналов в N циклах обзора. Если в окне из m циклов обзора число

обнаружений достигнет определенного значения n, то принимается решение об обнаружении новой траектории. Если же число обнаружений окажется меньше значения n, то окно смещается на один цикл в сторону увеличения.

На практике, обычно применяются критерии обнаружения траектории 2/2 и 2/3. В источнике [4] приведен сравнительный анализ критериев обнаружения траектории n/m. На основании данного анализа можно сделать следующие выводы:

- *с увеличением вероятности правильного обнаружения объекта увеличивается вероятность обнаружения траектории;*
- *при $n=m$ вероятность ложного обнаружения траектории будет меньше, чем при $n<m$.*

Эффективность рассмотренных методов n/m может анализироваться с помощью математического аппарата процессов Маркова.

В разработанных алгоритмах обнаружения траектории объекта по критерию n/m учитывается только информация о том, есть ли отметка в стробах сопровождения или ее нет, и не используется имеющаяся информация о значениях решающей статистики полученных отметок. Такой подход применим только при малой интенсивности ложных отметок в области обзора, а соответственно невозможно использовать при обнаружении объектов при малых отношениях сигнал/шум. Среди достоинств метода n/m необходимо отметить простоту реализации, что обусловило его широкое применение в существующих радиолокационных системах [5].

Метод последовательных испытаний применяется, в основном, в радиолокационных системах с электронным сканированием пространства. После каждого шага вычисляется отношение правдоподобия и сравнивается с двумя порогами: с порогом обнаружения и с порогом сброса [1].

Если текущее значение логарифма отношения правдоподобия превышает порог обнаружения, то траектория считается обнаруженной и передается на сопровождение. Если текущее значение логарифма отношения правдоподобия меньше порога сброса, то траектория считается ложной. Если же текущее значение логарифма отношения правдоподобия превышает порог сброса, но меньше порога обнаружения, принимается решение на продолжение наблюдения.

При обнаружении траектории методом последовательных испытаний принимаются следующие ограничения. Если в стробе появляется отметка, она может быть как истинной, так и ложной. Вероятность попадания истинной отметки в строб близка к единице. При наличии в стробе нескольких отметок предлагается выбирать одну из них в соответствии с правилами:

- *выбирается отметка, которая отобрана первой;*
- *выбирается отметка ближайшая к центру строба.*

В рассмотренном методе обнаружения траектории объекта не учитывается решающая статистика отметок.

Для сокращения времени обнаружения траектории на практике применяют усеченный метод последовательных испытаний, который заключается в ограничении числа наблюдений.

Метод последовательных испытаний отличается меньшим временем обнаружения траектории по сравнению с методом скользящего окна. Это объясняется возможностью применения программируемого сканирования пространства, что минимизирует время сканирования участков зоны обзора радиолокационных систем, в которых маловероятно появление обнаруживаемых объектов.

Этапы идентификации и экстраполяции связаны между собой. Необходимость этапа идентификации, т.е. принятия решения о возможном соответствии каждой из пришедших на данном обзоре отметок той или иной сопровождаемой траектории, диктуется тем, что система автоматического сопровождения объектов в режиме обзора должна сопровождать множество объектов на фоне помех. Задачей этапа идентификации является принятие решения о том, какой именно траектории может принадлежать та или иная отметка.

Процесс отождествления обычно включает в себя два этапа. Задача первого из них — стробирование, т.е. выделение из отметок, полученных на очередном такте обновления информации, тех, которые могут принадлежать определенному сопровождаемому объекту с учетом текущих оценок его положения в пространстве и динамики движения. В ходе стробирования для каждой траектории:

- *последнее известное положение объекта экстраполируется (предсказывается) на момент прихода отметки на текущем такте (в предположении о неизменном в течение этого интервала характере его движения). Выделяют три типа экстраполяции: 1 — в заданную временную точку; 2 — на заданное число шагов вперед; 3 — на основе данных за фиксированный интервал времени на момент времени вне этого интервала;*
- *определяется размер и ориентация в пространстве строба отождествления (области вокруг экстраполированной отметки, в которой с некоторой заданной вероятностью, как правило, близкой к единице, должна оказаться отметка от объекта), при этом учитываются погрешности текущего измерения и экстраполяции;*
- *формируется набор полученных на данном обзоре отметок, которые попадают в строб отождествления данной траектории.*

Если в строб отождествления попала одна отметка, принимается решение, что она соответствует данному объекту. Отметка передается этой траектории для дальнейшей обработки, идентификация на этом заканчивается. Если в стробе оказалось несколько отметок, возникает необходимость во втором этапе — точной идентификации, на котором из нескольких отметок выбирается одна, в наибольшей степени соответствующая данной траектории. Если в строб не попало ни одной отметки, проверяется критерий сброса траектории, и, если он не выполняется, за текущее положение объекта принимается экстра-

полированная оценка. Отметки, которые не попали в строб отождествления ни одной из траекторий, принимают за начальные отметки новых траекторий, по каждой из них начинается процесс обнаружения траектории.

После того как сопровождаемой траектории присвоена новая отметка, производится коррекция (фильтрация параметров траектории) с учетом вновь поступившей информации. Эта операция выполняется при помощи траекторного цифрового фильтра, где оценки координат и скорости объекта вычисляются на основе экстраполированных и измеренных значений его координат, взвешенных с учетом их погрешностей. Используемые в настоящее время алгоритмы траекторной фильтрации различаются способом учета предыдущих измерений (алгоритмы с фиксированной выборкой, рекуррентные), используемыми моделями движения (лилейные, нелинейные), а также способами учета возможного маневра объекта (с обнаружителем маневра либо без него, а также при использовании множества моделей).

Задачи фильтрации и экстраполяции являются центральными задачами при организации сопровождения воздушных объектов. При решении задачи фильтрации случайных (неизвестных) параметров динамической системы принципиальное значение имеет способ представления процесса изменения этих параметров во времени и уравнение, связывающее их между собой. При реализации сопровождения воздушных объектов это соответствует выбору математической модели траектории объекта.

В общем случае, кинематическое уравнение состояния, в котором учитывается только движение центра масс объекта (то есть объект рассматривается в виде материальной точки), записывается в виде дифференциального уравнения:

$$\mathbf{x}(t)=\mathbf{f}(\mathbf{x}(t))+\mathbf{g}(\xi_x(t)), \qquad (1)$$

а зависимость между вектором измеряемых координат $\mathbf{z}(t)$ и вектором оцениваемых $\mathbf{x}(t)$ (наблюдаемых и ненаблюдаемых) параметров траектории описывается выражением:

$$\mathbf{z}(t)=\mathbf{h}(\mathbf{x}(t),t)+\xi_и(t), \qquad (2)$$

где $\mathbf{x}(t)$ — вектор параметров траектории объекта; $\mathbf{f}(\cdot)$ — известная вектор-функция; $\mathbf{g}(\xi_x(t))$ — случайная вектор-функция, описывающая изменения параметров траектории объекта; $\mathbf{h}(\mathbf{x}(t),t)$ — известная вектор-функция; $\xi_и(t)$ — случайная вектор-функция, представляющая аддитивные ошибки измерения координат состояния.

Модель траектории объекта (1) вместе с моделью процесса измерений (2) образуют модель объединенной динамической системы, выходные сигналы которой подлежат фильтрации и дальнейшей траекторной обработке.

Задача фильтрации заключается в том, чтобы по результатам наблюдений случайного процесса на некотором интервале времени оценить его значение с наименьшими искажениями. Решение задачи фильтрации основано на получении апостериорной плотности распределения вероятности на очередном шаге измерений, для чего с помощью функции плотности распределения вероятности перехода необходимо экстраполировать многомерное апостериорное распределение параметра, полученное на предыдущем шаге, с дальнейшим умножением результата экстраполяции на значение функции правдоподобия очередного измерения, которое содержит вновь поступившие сведения о фильтруемом параметре [6].

Выражение для апостериорной плотности распределения вероятности фильтруемого параметра непосредственно используется для получения его оптимальной оценки, например, либо по критерию максимума апостериорной вероятности, либо по критерию максимального правдоподобия. При реализации алгоритмов автоматического сопровождения воздушных объектов фильтрации подлежат изменяющиеся во времени параметры сопровождаемых траекторий.

В общем случае, уравнения состояния и наблюдения могут иметь линейный и нелинейный характер, однако при практической реализации алгоритмов автоматического сопровождения воздушных объектов в радиолокационных системах, в подавляющем большинстве случаев используют различную аппроксимацию моделей и гауссовское распределение фильтруемого процесса, предопределяющее использование методов линейной фильтрации. Наиболее часто используется фильтр Калмана и его модификации, α-β-фильтры, фильтры Винера.

Указанные α-β-фильтры являются фильтрами последовательного оценивания координат и параметров движения (дальности, угловых координат, доплеровской частоты) при дискретном слежении за объектом. Они обеспечивают хорошее сглаживание и отслеживание перемещения объекта. Их достоинством является простота реализации, так как основные параметры фильтра (коэффициенты усиления и др.), в отличие от классического фильтра Калмана, являются постоянными величинами, не зависящими от наблюдений. Таким образом, α-β-фильтры можно представить как упрощенный вариант реализации классического фильтра Калмана второго порядка.

Показатели фильтра (точность оценок и динамические погрешности) практически не отличаются от аналогичных показателей фильтра Калмана при условии, что объекты перемещаются прямолинейно с постоянной скоростью на интервалах времени, равных периоду обращения к объекту. В этом случае обеспечивается минимальная величина среднеквадратической погрешности в оценке координаты объекта и его скорости. При интенсивно маневрирующем объекте погрешности оценивания увеличиваются, однако выбором коэффициентов усиления α и β можно обеспечить компромисс между требованием хорошего «сглаживания», т.е. необходимо иметь относительно узкую полосу пропускания, и возможностью отслеживания маневра объекта, что реально при более широкой полосе пропускания частот спектра. Достоинством α-β-фильтров является инвариантность к типу

маневрирующего объекта, т. е. пригодность к их сопровождению и оцениванию координат, независимо от размеров и маневренных возможностей объекта. Это обусловлено тем, что структура фильтра не связана со статистическими характеристиками модели движения цели.

Основные уравнения α-β-фильтрации для обобщенной координаты $x(t)$, как правило, дальность, скорость, угловые координаты, для каждого отсчета имеют вид:

$$\hat{x}(k)=x_э(k)+\alpha\left[z(k)-\hat{x}_э(k)\right], \quad (3)$$

$$\hat{\dot{x}}(k)=\dot{x}_э(k)+\beta\left[z(k)-\hat{x}_э(k)\right]/\Delta t, \quad (4)$$

где $\hat{x}(k)$ — сглаженная оценка координаты x_k, полученная в k-й момент наблюдения; $\hat{x}_э(k)$ — экстраполированная оценка координаты на k-й момент; $z(k)$ — измеренная величина на k-м шаге; $\Delta t=t_{k+1}-t_k$ — интервал времени между отсчетными значениями. Прогнозируемое значение координаты $\hat{x}_э(k)$ определяется соотношением

$$\hat{x}_э(k)=\hat{x}(k-1)+\hat{\dot{x}}(k-1)\Delta t,$$
$$x_э(k)=\hat{\dot{x}}_э(k-1), \quad (5)$$

где $\hat{\dot{x}}(k-1)$ — оценка скорости, полученная на предыдущем такте оценивания, может быть определена и по данным других измерителей, например, измерителей доплеровской частоты.

Анализ соотношений (3) и (4) показывает, что выбор параметров α и β существенно влияет на степень сглаживания и оценивания. Действительно, если α=0 и β=0, то это значит, что сглаживание практически отсутствует и новые измерения не вносят новые данные, т.е. оценки $\hat{x}(k)$ и $\hat{\dot{x}}(k)$ определяются только прогнозируемыми величинами. При наличии изменений в маневре объекта погрешности могут быть существенными, поэтому выбор значений коэффициентов α и β будет значительно влиять на степень сглаживания (фильтрации) траектории. В ряде работ [1], [7] показано, что приемлемые показатели оценивания можно получить, если выбрать коэффициенты α и β следующим образом:

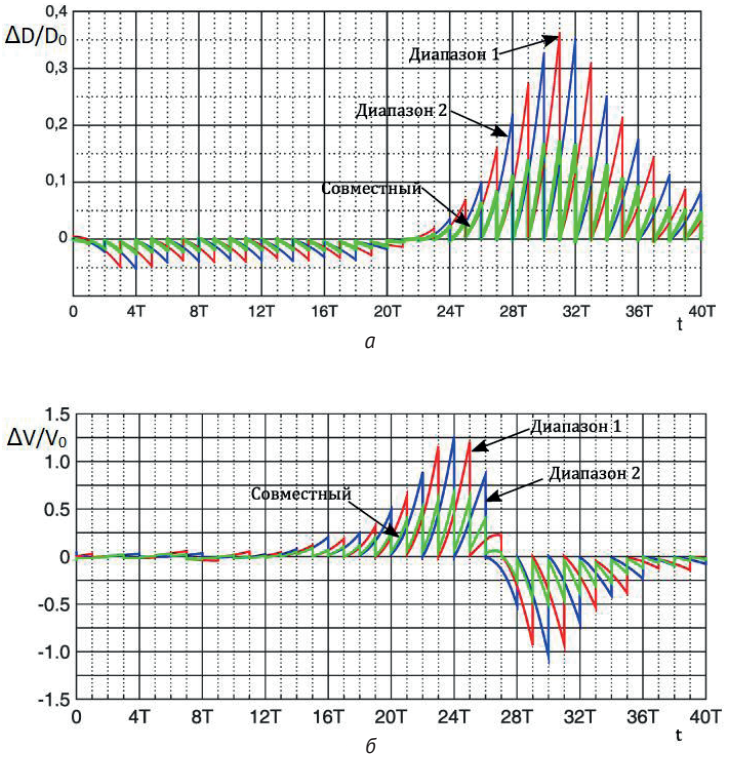


Рис.4. Сравнение ошибок оценивания дальности (а) и скорости (б) объекта для совместного и раздельного оценивания

$$\alpha=\frac{2(2k-1)}{k(k+1)}, \quad (6) \qquad \beta=\frac{6}{k(k+1)}. \quad (7)$$

В работе [8] приводится адаптивный алгоритм α-β-фильтрации. Спецификой этого алгоритма является использование адаптивной корректировки коэффициентов α и β, а также выполнение прогноза с малым шагом, что позволяет обеспечивать потребителей дынными о положении объекта в промежутках между приходом измерений:

$$\alpha(k)=\begin{cases}\dfrac{\Delta z_i^2(k)-D_\xi}{\Delta z_i^2(k)}, & \left|\Delta z_i(k)\right|>\Delta z_{i0}\\ \alpha, & \end{cases}, \quad (8)$$

$$\beta(k)=\frac{\alpha(k)}{\alpha}\beta. \quad (9)$$

Здесь $\Delta z_i(k)=\left[z(k)-\hat{x}_э(k)\right]$.

При моделировании в [8] использовались следующие исходные данные: два объекта, расположенные в одной плоскости на расстоянии $7{,}5D_0$ друг от друга, движутся навстречу с курсами $\varphi_{01}=3\pi/4$ и $\varphi_{02}=5\pi/4$ с одинаковыми скоростями $V_{o1}=V_{o2}=1{,}8V_o$, в то время как носитель системы сопровождения движется с курсом $\varphi_н=\pi/2$ со скоростью V_o. При этом система сопровождения носителя измеряет дальности до объектов, скорости сближения с ними и углы визирования в горизонтальной плоскости, среднеквадратическое отклонение ошибок измерений которых для первого и второго частотных диапазонов составляет соответственно: $\sigma_{D1}=\sigma_D$ и $\sigma_{D2}=1{,}5\sigma_D$ для канала дальности, $\sigma_{V1}=\sigma_V$ и $\sigma_{V2}=1{,}5\sigma_V$ для канала скорости сближения, $\sigma_{\theta1}=\sigma_\theta$ и $\sigma_{\theta2}=3\sigma_\theta$ для канала угла визирования в го-

ризонтальной плоскости.

По результатам исследований в [8] были получены зависимости ошибок оценивания дальности и скорости сближения для одно- и двухдиапазонных систем сопровождения при сопровождении объекта, маневрирующего со сменой знака скорости (*рис. 4*).

Из *рис. 4* видно, что применение совместного двухдиапазонного алгоритма многоцелевого сопровождения позволяет уменьшить ошибку оценивания дальности и скорости маневрирующих объектов в 2,3 и 2 раза соответственно. Исходя из этого можно сделать вывод, что одним из перспективных направлений совершенствования современных систем автоматического сопровождения воздушных объектов является применение двухдиапазонного алгоритма многоцелевого сопровождения с применением адаптивной α-β-фильтрации.

Заключение

В настоящее время не существует универсального алгоритма первичной обработки сигналов применительно к системам многоцелевого сопровождения объектов. Применяемые модулирующие функции не обеспечивают одновременную достаточную разрешающую способность по скорости и дальности до объекта. В связи с этим можно предложить следующие перспективные направления развития и совершенствования современных систем автоматического сопровождения воздушных объектов: поиск перспективной модулирующей функции, обеспечивающей достаточную разрешающую способность как по скорости, так и по дальности; разработка оптимального устройства обработки сигналов, обеспечивающего высокую вероятность правильного обнаружения при малом отношении сигнал/помеха по сравнению с современными алгоритмами обработки сигналов применительно к многоцелевому сопровождению объектов; поиск и реализация адаптивного алгоритма формирования диаграммы направленности, обеспечивающей требуемую помехозащищенность; многоцелевое сопровождение с применением адаптивной α-β-фильтрации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Меркулов, В. И. Автоматическое сопровождение целей в РЛС интегрированных авиационных комплексов: в 3 т. / В. И. Меркулов, В. С. Верба, А. Р. Ильчук. – М.: Радиотехника. – 2018. – Т. 1: Теоретические основы. РЛС в составе авиационного интегрированного комплекса. – 357 с.
2. Дудник, П. И. Многофункциональные радиолокационные системы / Под ред. Б. Г. Татарского. – М.: Дрофа, 2007. – 283 с.
3. Радиолокационные системы многофункциональных самолетов: в 3 т. / под ред. А. И. Канащенкова, В. И. Меркулова. – М.: Радиотехника. – 2006. – Т.1: РЛС - информационная основа боевых действий многофункциональных самолетов. Системы и алгоритмы первичной обработки радиолокационных сигналов. – 655 с.
4. Фарина, А. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей. / А. Фарина, Ф. Студер. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.
5. Ярлыков, М. С. Радиоэлектронные комплексы навигации, прицеливания и управления вооружением летательных аппаратов: в 2 т. / М. С. Ярлыков [и др.]. – М.: Радиотехника, 2012. – Т.1: Теоретические основы. – 504 с.
6. Ярлыков, М. С. Радиоэлектронные комплексы навигации, прицеливания и управления вооружением летательных аппаратов: в 2 т. / М. С. Ярлыков [и др.]. – М.: Радиотехника, 2012. – Т.2: Применение авиационных радиоэлектронных комплексов при решении боевых и навигационных задач. – 256 с.
7. Коновалов, А. А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации: в 2 ч. / А. А. Коновалов. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. – Ч.2. – 180 с.
8. Верба, В. С. Многодиапазонные радиолокационные системы. Проблемы многоцелевого сопровождения. / В. С. Верба, В. И. Меркулов, П. А. Садовский // Радиооптика. МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2015. – № 5. – С. 37-51.

REFERENCES

1. Merkulov, V. I. Automatic tracking of targets in the radar of integrated aviation systems: in 3 volumes / V.I. Merkulov, V.S. Verba, A.R. Ilchuk. – M.: Radio engineering. - 2018. – V. 1: Theoretical foundations. Radar as part of an aviation integrated complex. – 357 p.
2. Dudnik, P. I. Multifunctional radar systems / Ed. B.G. Tatarsky. – M.: Drofa, 2007. – 283 p.
3. Radar systems of multifunctional aircraft: in 3 volumes / ed. A. I. Kanashchenkova, V. I. Merkulova. – M.: Radio engineering. – 2006. – V.1: Radar – the information basis of the combat operations of multifunctional aircraft. Systems and algorithms for primary processing of radar signals. – 655 p.
4. Farina, A. Digital processing of radar information. Goal tracking. / A. Farina, F. Studer. – M.: Radio and communication, 1993. – 320 p.
5. Yarlykov, M. S. Radio-electronic complexes for navigation, aiming and control of weapons of aircraft: in 2 volumes / M. S. Yarlykov [et al.]. – M.: Radio engineering, 2012. – V.1: Theoretical foundations. – 504 p.
6. Yarlykov, M. S. Radio-electronic complexes for navigation, aiming and control of weapons of aircraft: in 2 volumes / M. S. Yarlykov [et al.]. – M.: Radiotekhnika, 2012. - V.2: The use of aviation radio-electronic systems in solving combat and navigation tasks. – 256 p.
7. Konovalov, A. A. Basics of trajectory processing of radar information: in 2 parts. / A. A. Konovalov. – St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg Electrotechnical University "LETI", 2014. – P.2. – 180 p.
8. Verba, V. S. Multiband radar systems. Problems of multipurpose support. / V. S. Verba, V. I. Merkulov, P. A. Sadovsky // Radio optics. MSTU im. N.E. Bauman. – 2015. – No. 5. – P. 37-51.

Статья поступила в редакцию
16.05.2022

УДК 004.94; 621.373

В.В. МАЛЕРОНОК, А.В. АЛИФАНОВ

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ В СРЕДЕ ANSYS ПРОЦЕССА МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА В АВИАСТРОЕНИИ

Владимир Владимирович Малеронок *– военнослужащий учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь*

Vladimir Maleronok *– Serviceman of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus*

Александр Викторович Алифанов *– доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии и оборудования машиностроения учреждения образования «Барановичский государственный университет», Республика Беларусь*
alifanov_aav@mail.ru

Alexander Alifanov *– Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technology and Equipment of Mechanical Engineering of the Baranovichi State University, Republic of Belarus*
alifanov_aav@mail.ru

Аннотация: *статья раскрывает подход к моделированию процесса магнитно-импульсной обработки (МИО) режущего инструмента, применяемого в авиастроительном производстве. Выделена основная проблематика, возникающая при выполнении 3D-моделирования в среде ANSYS. Рассмотрены возможности моделирования в среде программного обеспечения для инженерного анализа и численного моделирования ANSYS.*
Ключевые слова: *магнитно-импульсная обработка, 3D-модель, 3D-моделирование, режущий инструмент, программное обеспечение ANSYS.*

Abstract: *the article reveals an approach to modeling the process of magnetic-pulse technology (MPT) of a cutting tool used in aircraft manufacturing. The main problems that arise when performing 3D modeling in the ANSYS environment are highlighted. The possibilities of modeling in the software environment for engineering analysis and numerical simulation ANSYS are considered.*
Keywords: *magnetic pulse technology, 3D model, 3D modeling, cutting tool, ANSYS software.*

В авиастроительном производстве используется широкий спектр материалов (дюралюминиевые, магниевые и титановые сплавы, композиционные материалы, жаропрочные стали и др.) для изготовления деталей авиационной техники [1]. Инструменты, применяемые для обработки данных деталей, также достаточно разнообразны. Ряд инструментов является универсальным и подходит для обработки множества используемых материалов. Так, стоит выделить осевой режущий инструмент из быстрорежущей стали: сверла, фрезы, метчики [2].

Постоянно ведутся научно-исследовательские работы по улучшению свойств режущего инструмента и эффективности его применения в зависимости от вида обрабатываемого материала. При этом возникают сложности в анализе результатов исследования, связанные с трудозатратами и доступом к производственному оборудованию при проведении натурного эксперимента.

Экономически выгодным и научно-обоснованным решением является проведение моделирования, с целью оценки конструкторских решений и анализа результатов процессов обработки, направленных на улучшение свойств и увеличение возможностей режущего инструмента.

Использование передового программного обеспечения для инженерного анализа и численного моделирования ANSYS

Рис.1. Процесс сканирования сверла на 3D-сканере NIKON ALTERA 7.5.5

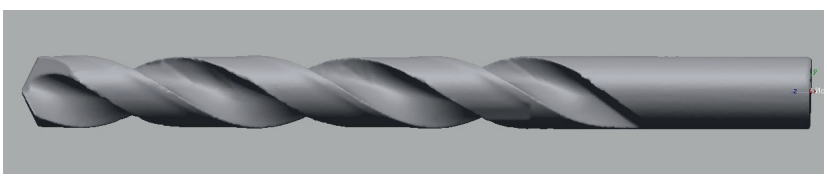
(№ 2017-б/140), позволяет получать качественные результаты исследуемых процессов, обеспечивает достаточную глубину научности и высокий уровень достоверности.

В качестве объектов моделирования выбраны: инструмент — осевое сверло из быстрорежущей стали диаметром 10 мм; процесс обработки — магнитно-импульсная обработка (МИО).

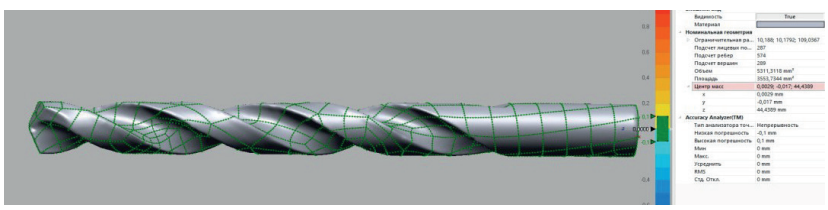
Магнитно-импульсная упрочняющая обработка металлов — это способ поверхностной пластической деформации металлов и их сплавов, осуществляемый при прямом преобразовании электрической энергии в механическую непосредственно в самом обрабатываемом изделии. Деформация токопроводящих материалов происходит в результате взаимодействия импульсного магнитного поля, создаваемого внешним источником (в индукторе), с током, индуктируемым этим полем в обрабатываемой детали. Токи, индуцируемые магнитным полем в заготовке, не только создают в ней внутреннее магнитное поле, но и нагревают поверхность заготовки [3].

Для получения 3D-модели инструмента выполнено его сканирование на 3D сканере NIKON ALTERA 7.5.5 в учреждении образования «Белорусская государственная академия авиации» (*рис. 1*).

После сканирования выполнено построение 3D-модели с созданием сетки поверхности (автоповерхность) (*рис. 2*) и выбором основных эскизов для построения сечений при анализе результатов моделирования или в качестве 2D-моделей

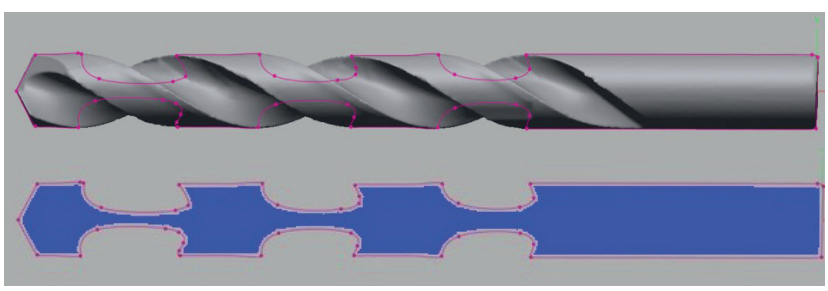


а

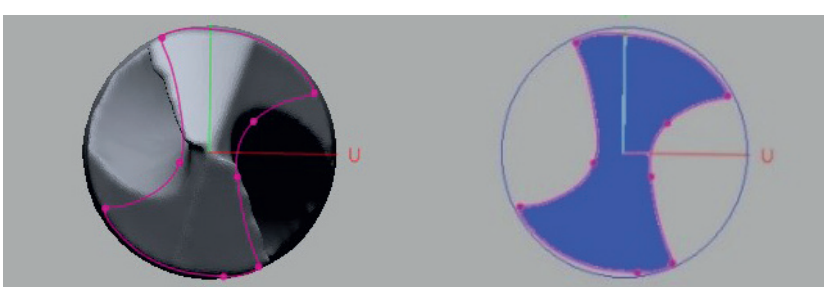


б

Рис.2. 3D-модель (а) и автоповерхность (б) сверла



а



б

Рис.3. Эскиз продольного (а) и поперечного (б) сечений сверла диаметром 10 мм и длиной 106 мм

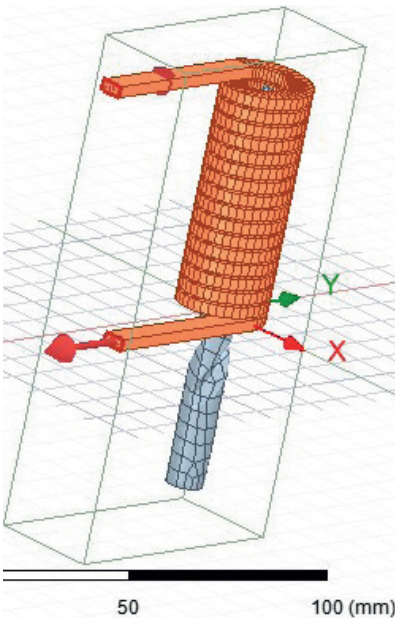


Рис.4. 3D-система «индуктор-изделие» в воздушной среде

для моделирования (*рис. 3*).

При построении 3D-системы «индуктор-изделие» (элемент процесса МИО) в программе Ansys Electronics Desktop (Maxwell) использована отсканированная 3D-модель режущего инструмента (сверла), а также создана окружающая среда, заполненная воздухом, что повышает достоверность ожидаемых результатов (*рис. 4*) [4].

Выбор материалов

Материал данного сверла — сталь Р6М5 (аналог HSS) в большинстве программ для моделирования электромагнитных и тепловых явлений (ANSYS, FEMM и др.) в библиотеке материалов отсутствует. Имеющиеся в библиотеке программы материалы отличаются разной степенью описания физических свойств (магнитных, электрических, механических и др.). В связи с чем встает выбор между наиболее близким материалом к оригиналу или материалом с достаточным набором описанных свойств (удельное сопротивление, магнитная проницаемость, теплоемкость, предел текучести, упругость и пр.), часть из которых имеет нелинейную зависимость и не является константой.

В качестве подходящего материала для моделирования и последующего анализа выбрана сталь 1010 (аналог 10) с наиболее полным описанием свойств, в частности, наличием зависимости изменения магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля (*рис. 5*).

Схема проекта (1 цикл) представлена на *рис. 6* и состоит из двух основных блоков: Ansys Electronics Desktop (Maxwell) (модуль для электромагнитного анализа [моделирование разряда при МИО]) и Ansys Transient Thermal (модуль — для расчета тепловых процессов [нагрев сверла при разряде вовремя МИО и остывание между повторными разрядами]) [5].

3D-моделирование является фундаментальным подходом, с достаточной глубиной научности и высоким уровнем достоверности, при анализе процессов и оценке инженерных решений. Однако требует наличия значительных аппаратных возможностей (многоядерный процессор от 4 ядер и частотой от 2000 МГц, объем ОЗУ от 16 ГБ, объем диска для установки программ и хранения данных от 1 ТБ) и дорогостоящего лицензионного программного обеспечения (ANSYS 19.2 и выше версии), что ограничивает такой подход для анализа с небольшим количеством оценочных параметров. С целью упрощения процесса моделирования (снижение аппаратных требований, сокращения времени расчета) можно использовать 2D-модели инструмента [6].

Интерпретация 2D-моделей

Стоит отметить проблематику моделирования режущего инстру-

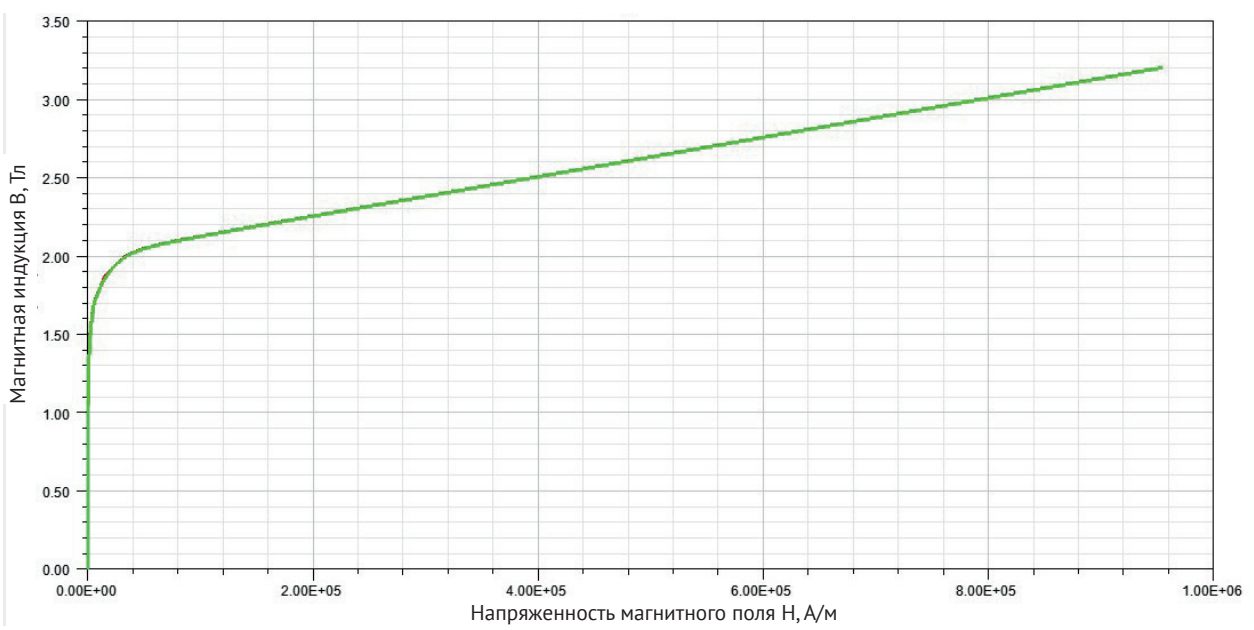


Рис.5. Зависимость магнитной индукции B (магнитной проницаемости μ) от напряженности магнитного поля H для стали 1010, согласно библиотеке материалов ANSYS

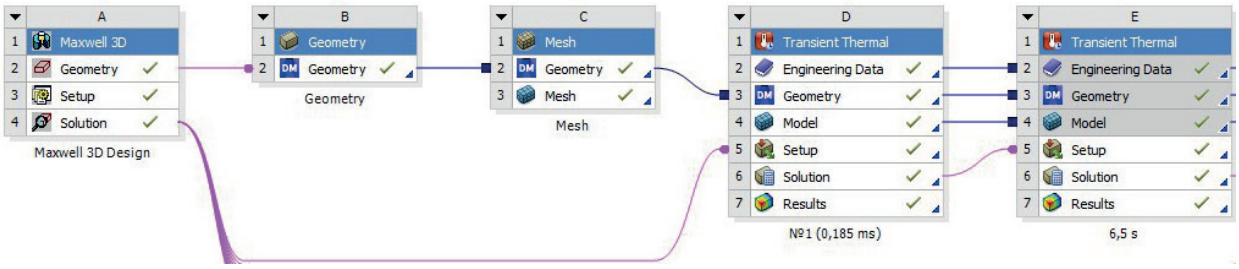


Рис.6. Схема проекта в Ansys Workbench для моделирования 1 цикла процесса МИО

мента (сверла, фрезы, метчики) при использовании 2D-моделей основных сечений: продольного и поперечного (*рис. 3*). Так, при построении 3D-модели по продольному сечению (*рис. 7, а*), программа интерпретирует ее как прямоугольный брусок с пазами (или цилиндр с канавками), что приводит к более простому пути протекания индукционного тока и завышенным значениям температуры нагрева при разряде во время МИО [7].

А при построении 3D-модели по поперечному сечению (*рис. 7, б*) программа интерпретирует ее как раскрученную спираль сверла без режущих кромок, что более точно по сравнению с продольным построением. Однако один виток индуктора выстраивается в цилиндр, по которому продольно протекает разрядный ток, что порождает неправильное (по направлению) магнитное поле. В результате вихревые индукционные токи моделируются неправильно (по направлению), что приводит к сильно заниженным значениям рассчитанной температуры нагрева при разряде во время МИО.

Результаты, полученные для исходной 3D-модели, представлены на *рис. 8*.

Сравнение значений температуры нагрева из *рис. 7* и *8*

$$T_{\text{3D-модель}} = 177\ ^\circ\text{C};$$

$$T_{\text{2D продол.сеч.}} = 224\ ^\circ\text{C};$$

$$T_{\text{2D попереч.сеч.}} = 25\ ^\circ\text{C}$$

подтверждает ложность в оценке распределения плотности индукционного тока и температуры нагрева для 2D-моделей. Следовательно, для определения возможности перехода к 2D-моделированию необходимо проанализировать геометрию 3D-объекта моделирования.

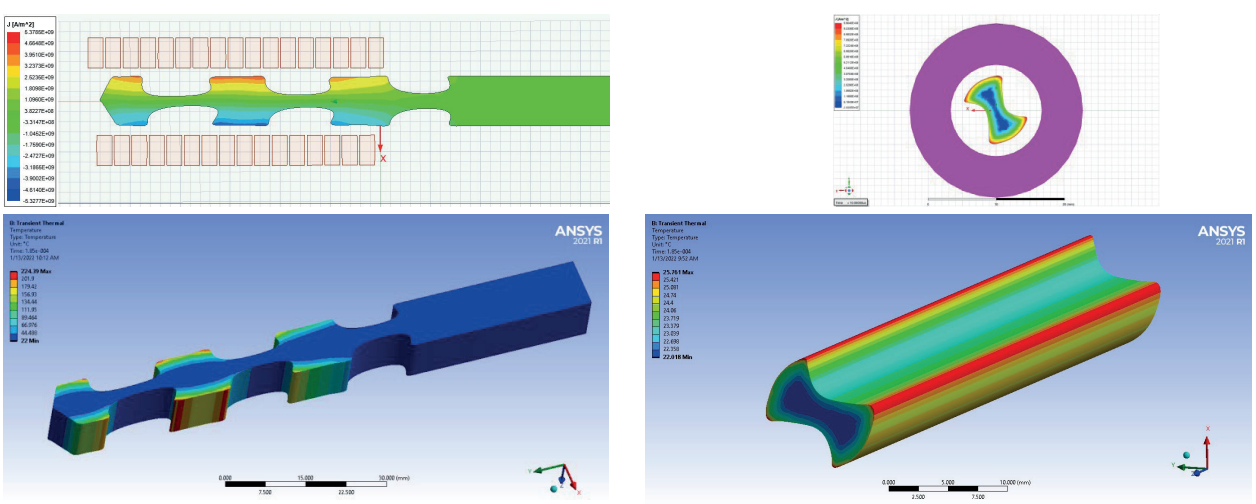
Количество спорных решений при выполнении моделирования велико и требует основательного подхода со знанием физических свойств материалов, геометрических особенностей объектов моделирования и возникающих физических явлений при протекании процесса обработки.

Заключение

Использование среды для инженерного анализа и численного моделирования ANSYS позволяет выполнить моделирование в полном объеме технологического процесса, что дает качественные результаты анализа исследуемого процесса.

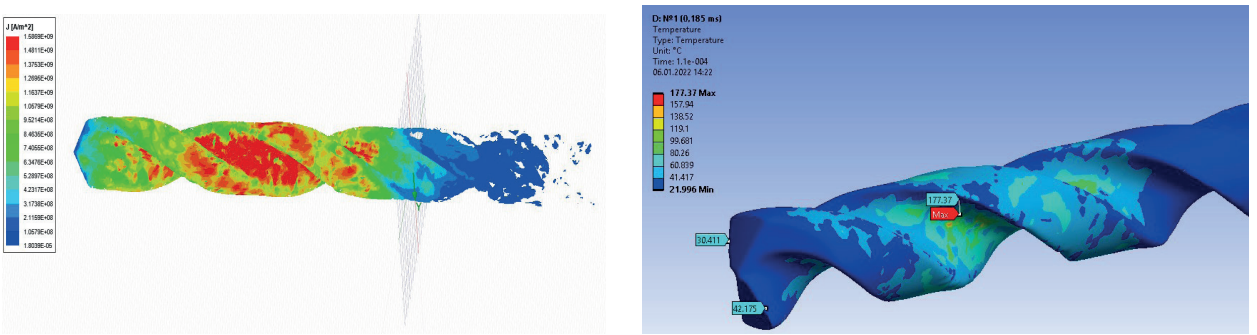
При задании материалов для 3D-моделей встает выбор между наиболее близким материалом к оригиналу или материалом с достаточным набором описанных свойств.

При переходе к 2D-моделированию необходимо проанализировать геометрию 3D-объекта моделирования и удостовериться



а *б*

Рис.7. 3D-модели, построенные по: продольному (а) и поперечному (б) сечениям сверла



а *б*

Рис.8. Распределение плотности индукционного тока (а) и температуры нагрева (б) по объему сверла

в такой возможности, с целью неполучения ложноположительных (отрицательных) результатов моделирования.

Учет физических свойств, геометрических особенностей объектов моделирования и возникающих физических явлений при протекании процесса обработки, делает данный подход к моделированию процесса МИО режущего инструмента (применяемого в авиастроительном производстве) фундаментальным, с достаточной глубиной научности и высоким уровнем достоверности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Баранов, Д. А. Производство и ремонт летательных аппаратов и двигателей : в 2 ч. / Д. А. Баранов, В. М. Самойленко. – М. : ИД Академии Жуковского, 2018. – Ч. 1: Производство авиационной техники : учебное пособие. – 88 с.
2. Баранов, Д. А. Производство и ремонт летательных аппаратов и двигателей : в 2 ч. / Д. А. Баранов, В. М. Самойленко. – М. : ИД Академии Жуковского, 2018. – Ч. 2 : Ремонт авиационной техники: учебное пособие. – 80 с.
3. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка изделий из конструкционных и инструментальных сталей / А. В. Алифанов и др. // Литье и металлургия. – 2012. – № 3. – С. 77-82.
4. Ansoft. Maxwell 3D. Electromagnetic and Electromechanical Analysis [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/CompleteMaxwell3D_V11.pdf. — Дата доступа: 31.01.2022.
5. Ansys [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.ansys.com. — Дата доступа: 31.01.2022.
6. Ansoft. Maxwell 2D. Electromagnetic and Electromechanical Analysis [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/CompleteMaxwell2D_V14.pdf. – Дата доступа: 31.01.2022.
7. Transient Thermal Analysis in Ansys Mechanical Workbench: Dealing with Non-Physical Temperature Results [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://simutechgroup.com/transient-thermal-analysis-in-ansys-mechanical-workbench-dealing-with-non-physical-temperature-results. – Дата доступа: 31.01.2022.

REFERENCES

1. Baranov, D. A. Proizvodstvo i remont letatel'nyh apparatov i dvigatelej : v 2 ch. / D. A. Baranov, V. M. Samojlenko. – M. : ID Akademii ZHukovskogo, 2018. – V. 1 : Proizvodstvo aviacionnoj tekhniki : uchebnoe posobie. – 88 p.
2. Baranov, D. A. Proizvodstvo i remont letatel'nyh apparatov i dvigatelej : v 2 ch. / D. A. Baranov, V. M. Samojlenko. – M. : ID Akademii ZHukovskogo, 2018. – V. 2 : Remont aviacionnoj tekhniki: uchebnoe posobie. – 80 p.
3. Magnitno-impul'snaya uprochnyayushchaya obrabotka izdelij iz konstrukcionnyh i instrumental'nyh stalej / A. V. Alifanov, [et al.] // Lit'e i metallurgiya. – 2012. – № 3. – P. 77-82.
4. Ansoft. Maxwell 3D. Electromagnetic and Electromechanical Analysis [Electronic resource]. – Mode of access: http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/CompleteMaxwell3D_V11.pdf. — Date of access: 31.01.2022.
5. Ansys [Electronic resource]. – Mode of access: https://www.ansys.com. – Date of access: 31.01.2022.
6. Ansoft. Maxwell 2D. Electromagnetic and Electromechanical Analysis [Electronic resource]. – Mode of access: http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/CompleteMaxwell2D_V14.pdf. – Data dostupa: 31.01.2022.
7. Transient Thermal Analysis in Ansys Mechanical Workbench: Dealing with Non-Physical Temperature Results [Electronic resource]. – Mode of access: https://simutechgroup.com/transient-thermal-analysis-in-ansys-mechanical-workbench-dealing-with-non-physical-temperature-results. – Date of access: 31.01.2022.

Статья поступила в редакцию 16.02.2022

УДК 629.17

И.А. ПОТАПОВ, А.В. КОСИЦЫН, О.А. КОНОПЕЛЬКО

СПОСОБ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ КОНТЕЙНЕРА СЪЕМНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ВОЗДУШНОГО СУДНА НА ОСНОВЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Иван Александрович Потапов *– военнослужащий учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь», Республика Беларусь*

Андрей Валериевич Косицын *– кандидат технических наук, доцент, военнослужащий учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь», Республика Беларусь*

Олег Александрович Конопелько *– кандидат технических наук, доцент, военнослужащий учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь», Республика Беларусь*

Ivan Potapov*– Serviceman of Military Academy of the Republic of Belarus, Republic of Belarus*

Andrey Kositsyn *– Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Serviceman of Military Academy of the Republic of Belarus, Republic of Belarus*

Oleg Konopelko *– Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Serviceman of Military Academy of the Republic of Belarus, Republic of Belarus*

Аннотация: *в статье представлен анализ состояния проблемы исследования, представлена математическая модель, описывающая температурное поле элементов авиационного контейнера с внутренним охлаждением блоков. Применен алгоритм решения краевой задачи определения температурного поля контейнера. Разработан способ расчета температурного поля элементов конструкции авиационного контейнера с внутренним охлаждением блоков, учитывающий влияние кинетического нагрева, условий охлаждения и мощности внутренних источников тепла в стационарной постановке задачи.*

Ключевые слова: *съемное оборудование, кинетический нагрев, математическая модель, метод конечных элементов, способ расчета.*

Abstract: *the paper presents an analysis of the state of the research problem, presents a mathematical model describing the temperature field of the elements of an aircraft container with internal cooling units, and applies an algorithm for solving the boundary value problem of determining the temperature field of the container. A method has been developed for calculating the temperature field of structural elements of an aircraft container with internal cooling units, taking into account the influence of kinetic heating, cooling conditions and the power of internal heat sources in a stationary formulation of the problem.*

Keywords: *removable equipment, kinetic heating, mathematical model, finite element method, calculation method.*

Активное развитие в Республике Беларусь получила разработка бортовых комплексов обороны (БКО) воздушных судов (ВС). Основной задачей БКО является обеспечение защиты боевых самолетов от авиационных и зенитных средств поражения. Часто БКО разрабатываются на базе подвесных контейнеров, входящих в состав съемного оборудования (СО) ВС. Бортовые комплексы, системы и средства радиоэлектронной борьбы в ходе боевых действий решают вполне конкретные функциональные задачи. Степень решения этих задач в конкретных условиях и за конкретный промежуток времени дает некоторый эффект. Под эффектом понимается результат целенаправленного действия ВС, на котором находится БКО.

Одним из важных направлений

повышения эффективности БКО является расширение условий его работы [1]. Определенные особенности на его применение накладывает полет на сверхзвуковой скорости, где на планер самолёта и его СО воздействуют не только повышенные аэродинамические нагрузки, но и кинетический нагрев.

Постановка задачи

Нагрев самолета в полете происходит главным образом по двум причинам: от аэродинамического торможения воздушного потока и от тепловыделения внутренних источников (двигателя, радиоэлектронного оборудования — РЭО). Оба эти явления составляют процесс взаимодействия между средой (воздухом) и обтекаемым твердым телом (самолетом).

Торможение высокоскоростного потока воздуха у обшивки контейнера ведет к его кинетическому нагреву, вызванному переходом кинетической энергии газа в тепловую. В [2] проведены исследования влияния дозвукового и сверхзвукового режимов полета на температуру корпуса авиационного контейнера с последующим нестационарным тепловым расчетом внутри его. Расчеты проведены в программном комплексе инженерного анализа. В результате аэродинамического расчета корпуса при $H = 11\,000$ м на сверхзвуковом ($M = 2{,}2$) и дозвуковом ($M = 0{,}5$) течении получены картины распределения давления, температуры в пограничном слое и по поверхности изделия с учетом заданных условий полета. Так, максимальная температура в тепловом пограничном слое составила 215 °С, а поверхности переднего обтекателя — 153 °С. Значения указанных температур хорошо согласуются с результатами решения аналитических зависимостей. На дозвуковых режимах полета нагрев конструкции значительно ниже и не превышает −10 °С.

Второе явление типично как для всех самолетов в целом, так и для СО с внутренними источниками тепла, и связано с повышением температуры элементов оборудования, выделяющих тепло при работе. Наличие внутренних мощных источников усугубляет процесс распространения тепла. Высокий нагрев блоков РЭО без применения специальных защитных мероприятий существенно ограничивает область применения СО. Для обеспечения требуемых условий эксплуатации радиоэлектронных блоков в полете на сверхзвуковой скорости эта задача решается применением систем охлаждения или систем термостабилизации.

Особый интерес при выборе способа охлаждения блоков СО представляет вопрос о расчете температурных полей элементов конструкции контейнера при различных режимах полета и условиях их работы.

Таким образом, целью работы является разработка способа расчета температурного поля контейнера СО ВС для оптимизации процессов его термостабилизации.

Решение задачи

На первом этапе при решении задач вычислительной термомеханики определяют температурные поля в исследуемых областях. В общем случае при решении задач теплопроводности, как при стационарных, так и при нестационарных тепловых режимах используют основное дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье, описывающее распределение температур в твердом теле. В декартовой прямоугольной системе координат (0, x, y, z), связанной с телом, такое уравнение имеет вид [3]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\lambda}{c\rho}\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\lambda}{c\rho}\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\lambda}{c\rho}\frac{\partial T}{\partial z}\right) + Q_v, \quad (1)$$

где T — температура тела; τ — текущее время; c — удельная теплоемкость вещества; ρ — плотность вещества; λ — коэффициент теплопроводности веще-ства; Q_v — внутреннее тепловыделение.

В тепловых условиях работы большинства элементов авиационного и радиоэлектронного оборудования процесс теплопереноса теплопроводностью можно считать медленно меняющимся во времени. Это дает возможность использовать для тепловых расчетов решение задач в стационарной постановке. Учитывая, что авиационный контейнер является осесимметричным и градиенты температур в направлении оси z отсутствуют, вполне достаточно ограничиться рассмотрением двухмерной задачи по определению его температурного поля в одной из плоскостей. Для твердого тела с изотропными и однородными свойствами уравнение (1) упрощается и принимает вид:

$$a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) + Q_v = 0 \quad (2)$$

где $a = \dfrac{\lambda}{c\rho}$ — коэффициент температуропроводности.

В общем случае уравнение теплопроводности имеет множество решений. Для того, чтобы уравнение теплопроводности имело единственное решение, моделировало конкретную физическую ситуацию, необходимо задание граничных условий, которые определяют взаимодействие тела с окружающей средой и могут быть заданы условиями первого, второго и третьего рода.

В работе [4] представлена математическая модель, описывающая температурное поле элементов авиационного контейнера с внутренним охлаждением блоков с учетом влияния: кинетического нагрева, условий охлаждения и мощности внутренних источников тепла в стационарной постановке задачи:

$$\begin{cases} a\left(\dfrac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \dfrac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) + Q_v = 0, \\ \alpha_{гс}(y)(T_г(y) - T_{ст2}(y)) = -\lambda'_{экв}\dfrac{\partial T_{ст}}{\partial x}, \\ \alpha_{ги}(y)(T_г(y) - T_и(y)) + q_v = -\lambda_и\dfrac{\partial T_и}{\partial x}, \\ T_{ст1}(y) = T_Т\left(1 + r\dfrac{k-1}{2}M^2\right). \end{cases} \quad (3)$$

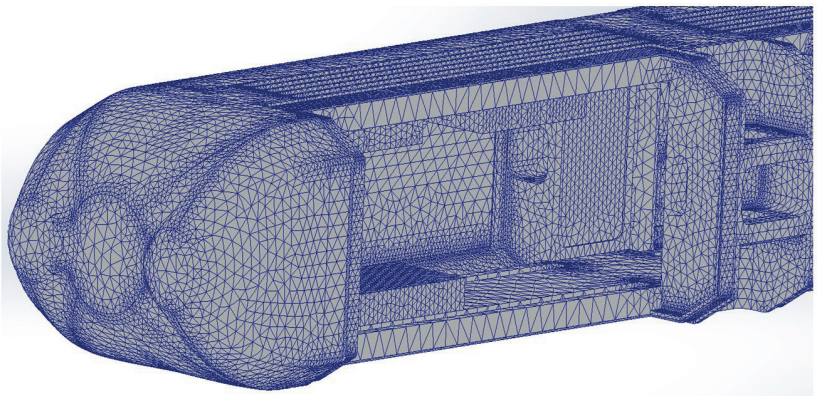


Рис.1. Конечно-элементная модель авиационного контейнера в програмном пакете SolidWorks

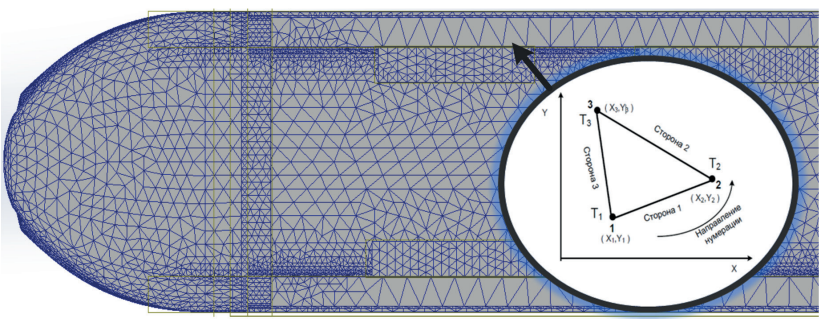


Рис.2. Разбиение области на двумерные симплекс-элементы

где k — показатель адиабаты (для воздуха $k = 1{,}4$); r — коэффициент восстановления температуры; $T_г$ — температура воздуха внутри контейнера (горячая); $T_и$ — температура поверхности элементов с внутренними источниками тепла; $T_{ст1}$ — температура на внешней поверхности стенки; $T_{ст2}$ — температура на внутренней поверхности стенки; $T_т$ — температура окружающего воздуха (теплоносителя); $\alpha_{ги}$ — коэффициент теплоотдачи между внутренним воздухом и элементами с внутренними источниками тепла (блоками оборудования контейнера); $\alpha_{гс}$ — коэффициент теплоотдачи между охлаждающим воздухом и внутренней поверхностью стенки; $\lambda'_{экв}$ — эквивалентный коэффициент теплопроводности стенки.

В такой постановке двумерная стационарная с нелинейными граничными условиями задача не имеет точного аналитического решения. Приближенные аналитические методы решения подобных задач изложены в работе [5]. Однако, как отмечено в монографии [6], при решении нелинейных двумерных краевых задач теплопроводности в областях со сложной конфигурацией границ необходимо применять численные методы. Порядок решения задач теплопроводности численными методами приводится в работах [7—9].

В настоящее время метод конечных элементов является одним из наиболее популярных численных методов решения краевых задач в системах автоматизированного проектирования. Строгое доказательство таких важных свойств как сходимость, устойчивость и точность приводится в [7—11].

Первый этап решения системы уравнений (3) состоит в разбиении области, занятой телом, на элементы. Дискретизация области включает: выбор формы элементов; задание их размеров и количества; нумерацию элементов и узлов. При этом элементы, аппроксимирующие область в целом, могут быть разными как по форме (треугольными, четырехугольными), так и по размерам (*рис. 1*).

Поскольку в данном случае решается двумерная задача по определению температурного поля контейнера в одной из плоскостей, тогда при разбиении двумерной области на конечные элементы применяется двумерный симплекс-элемент. Это треугольник, имеющий три прямолинейные стороны и три узла. Нумеруются узлы последовательно против часовой стрелки, начиная с произвольного i-го узла (*рис. 2*).

На втором этапе для каждого элемента должна задаваться интерполяционная функция (элементная). В общем случае эти функции должны быть непрерывными, а их производные до $n-1$ порядка постоянными или непрерывными внутри каждого элемента (n — порядок старшей производной в дифференциальном уравнении).

Обозначим узловые значения температуры T_1, T_2, T_3. Температура в точке конечного элемента (КЭ) с координатами x, y определяется по формуле [12]:

$$T = N_1 \cdot T_1 + N_2 \cdot T_2 + N_3 \cdot T_3. \qquad (4)$$

Функции формы, применяемые для этого КЭ, примут вид:

$$N_1 = \frac{1}{2 \cdot A}\left[a_1 + b_1 \cdot X + c_1 \cdot Y\right],$$
$$N_2 = \frac{1}{2 \cdot A}\left[a_2 + b_2 \cdot X + c_2 \cdot Y\right], \qquad (5)$$
$$N_3 = \frac{1}{2 \cdot A}\left[a_3 + b_3 \cdot X + c_3 \cdot Y\right].$$

Площадь КЭ вычисляется по формуле:

$$A = \frac{1}{2} \cdot \begin{vmatrix} 1 & X_1 & Y_1 \\ 1 & X_2 & Y_2 \\ 1 & X_3 & Y_3 \end{vmatrix}. \qquad (6)$$

Коэффициенты, входящие в состав формы, зависят от координат узлов:

$$a_1 = X_2 \cdot Y_3 - X_3 \cdot Y_2,$$
$$a_2 = X_3 \cdot Y_1 - X_1 \cdot Y_3,$$
$$a_3 = X_1 \cdot Y_2 - X_2 \cdot Y_1,$$
$$b_1 = Y_2 - Y_3, \; c_1 = X_3 - X_2, \qquad (7)$$
$$b_2 = Y_3 - Y_1, \; c_2 = X_1 - X_3,$$
$$b_3 = Y_1 - Y_2, \; c_3 = X_2 - X_1.$$

Интерполяционную функцию элемента удобно записать в матричном виде:

$$T = [N] \cdot \{T\}, \tag{8}$$

Таким образом, решение системы уравнений (3) по двумерной области S с граничными условиями на ее границе Г эквивалентно отысканию минимума функционала [12]:

$$\Phi(x,y) = \int_s \frac{1}{2}\left[a_x \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + a_y \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2 - 2Q \cdot T\right] \cdot dS + \int_\Gamma \left[q \cdot T_w + \frac{1}{2}\alpha \cdot (T_w - T_\Gamma)^2\right] \cdot d\Gamma. \tag{9}$$

При решении задачи методом конечных элементов область S разбивается на n подобластей (КЭ), в форме треугольников. Функционал записывается как сумма вкладов всех КЭ по области S. Тогда (8) примет вид:

$$\Phi(x,y) = \sum_{e=1}^{n} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \cdot \int_{s^e} \left(\left\{g^{(e)}\right\}^T \cdot \left[D^{(e)}\right] \cdot \left\{g^{(e)}\right\} - T^{(e)} \cdot Q^{(e)}\right) \cdot dS - \int_{\Gamma_1^e} T^{(e)} \cdot q^{(e)} \cdot d\Gamma_1 + \\ + \int_{\Gamma_2^e} \frac{\alpha_{\text{гс}}}{2}\left(T^{(e)} \cdot T^{(e)} - 2 \cdot T^{(e)} \cdot T_{\text{г}} + T_{\text{г}}^2\right) \cdot d\Gamma_2 + \\ + \int_{\Gamma_{\text{и}}} \left(\frac{\alpha_{\text{ги}}}{2}\left(T^{(e)} \cdot T^{(e)} - 2 \cdot T^{(e)} \cdot T_{\text{г}} + T_{\text{г}}^2\right) + q_v^{(e)}\right) \cdot d\Gamma_{\text{и}} \end{bmatrix} = \sum_{e=1}^{n} \Phi^{(e)}(x,y) \tag{10}$$

где $\left\{g^{(e)}\right\}^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial T^{(e)}}{\partial x} & \frac{\partial T^{(e)}}{\partial y} \end{bmatrix}$ — матрица температур КЭ; $\left[D^{(e)}\right] = \begin{bmatrix} a_x^{(e)} & 0 \\ 0 & a_y^{(e)} \end{bmatrix}$ — матрица коэффициентов температуропроводности.

Тогда температура, изменяющаяся в пределах КЭ, через узловые значения определяется выражением:

$$T^{(e)} = [N^{(e)}] \cdot \{T\}, \tag{11}$$

где $[N^{(e)}]$ — матрица функций формы КЭ, учитывающая распределения температуры в пределах КЭ.

Тогда

$$\left\{g^{(e)}\right\} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1^{(e)}}{\partial x} & \frac{\partial N_2^{(e)}}{\partial x} & \frac{\partial N_3^{(e)}}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1^{(e)}}{\partial y} & \frac{\partial N_2^{(e)}}{\partial y} & \frac{\partial N_3^{(e)}}{\partial y} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{Bmatrix} = \left[B^{(e)}\right] \cdot \{T\}, \tag{12}$$

где $[B^{(e)}]$ — матрица градиентов функций формы КЭ.

Вклад каждого КЭ в выражение для функционала (8) будет определяться:

$$\begin{aligned} \Phi(x,y) = & \int_{s^e} \frac{1}{2} \cdot \{T\}^T \cdot \left[B^{(e)}\right]^T \cdot \left[D^{(e)}\right] \cdot \left[B^{(e)}\right] \cdot \{T\} \cdot dS - \int_{s^e} Q^{(e)} \cdot \left[N^{(e)}\right] \cdot \{T\} \cdot dS + \int_{\Gamma_1^e} q^{(e)} \cdot \left[N^{(e)}\right] \cdot \{T\} \cdot d\Gamma_1 + \\ & + \int_{\Gamma_2^e} \frac{\alpha_{\text{гс}}^{(e)}}{2} \cdot [T]^T \cdot \left[N^{(e)}\right]^T \cdot \left[N^{(e)}\right] \cdot \{T\} \cdot d\Gamma_2 - \int_{\Gamma_2^e} \alpha_{\text{гс}}^{(e)} \cdot [T_{\text{г}}] \cdot \left[N^{(e)}\right]^T \cdot \{T\} \cdot d\Gamma_2 + \int_{\Gamma_2^e} \frac{\alpha_{\text{гс}}^{(e)}}{2} \cdot [T_{\text{г}}]^2 \cdot d\Gamma_2 + \\ & + \int_{\Gamma_{\text{и}}^e} \frac{\alpha_{\text{и}}^{(e)}}{2} \cdot [T]^T \cdot \left[N^{(e)}\right]^T \cdot \left[N^{(e)}\right] \cdot \{T\} \cdot d\Gamma_{\text{и}} - \int_{\Gamma_{\text{и}}^e} \alpha_{\text{и}}^{(e)} \cdot [T_{\text{г}}] \cdot \left[N^{(e)}\right]^T \cdot \{T\} \cdot d\Gamma_{\text{и}} + \int_{\Gamma_{\text{и}}^e} \frac{\alpha_{\text{и}}^{(e)}}{2} \cdot [T_{\text{г}}]^2 \cdot d\Gamma_{\text{и}} + \int_{\Gamma_{\text{и}}^e} q_v^{(e)} \cdot \left[N^{(e)}\right] \cdot \{T\} \cdot d\Gamma_{\text{и}} \end{aligned} \tag{13}$$

Минимум функционала (13) требует выполнения следующего условия:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \{T\}} = \sum_{e=1}^{n} \frac{\partial \Phi^{(e)}}{\partial \{T\}} = 0. \tag{14}$$

Для отдельного КЭ

$$\frac{\partial \Phi^{(e)}}{\partial \{T\}} = \left[k^{(e)}\right] \cdot \{T\} + \left\{F^{(e)}\right\}, \tag{15}$$

где $[k^e]$ — матрица температуропроводности для треугольного КЭ.

С учетом коэффициентов формы КЭ матрица имеет вид:

$$\left[k^{(e)}\right]=\frac{a_x}{4A}\cdot\begin{bmatrix} b_1\cdot b_1 & b_1\cdot b_2 & b_1\cdot b_3 \\ b_2\cdot b_1 & b_2\cdot b_2 & b_2\cdot b_3 \\ b_3\cdot b_1 & b_3\cdot b_2 & b_3\cdot b_3 \end{bmatrix}+\frac{a_y}{4A}\cdot\begin{bmatrix} c_1\cdot c_1 & c_1\cdot c_2 & c_1\cdot c_3 \\ c_2\cdot c_1 & c_2\cdot c_2 & c_2\cdot c_3 \\ c_3\cdot c_1 & c_3\cdot c_2 & c_3\cdot c_3 \end{bmatrix}+$$
$$+\frac{\alpha^{(e)}\cdot L_{1-2}}{6}\cdot\begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}+\frac{\alpha^{(e)}\cdot L_{2-3}}{6}\cdot\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}+\frac{\alpha^{(e)}\cdot L_{3-1}}{6}\cdot\begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 2 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

где $L_{1\text{-}2}$, $L_{2\text{-}3}$, $L_{3\text{-}1}$ — длины соответствующих сторон КЭ.

Последние три члена учитывают конвективный теплообмен по каждой стороне КЭ. Так как КЭ входит составной частью в рассматриваемую область, то конвективный теплообмен происходит по одной или двум сторонам КЭ.

Внешними воздействиями на конечный элемент являются:

1. Источник тепла внутри КЭ постоянной интенсивности $Q^{(e)}$;
2. Приток тепла за счет теплового потока $q^{(e)}$;
3. Конвективный теплообмен не более чем по двум сторонам КЭ с коэффициентом теплообмена $\alpha^{(e)}$.

Вектор внешних воздействий на КЭ имеет вид:

$$F^{(e)}=\frac{Q^{(e)}}{3}\cdot\begin{Bmatrix}1\\1\\1\end{Bmatrix}+\frac{q^{(e)}+\alpha_{\text{гс}}\cdot(T_{\text{г}})+\alpha_{\text{и}}\cdot(T_{\text{г}})}{2}\cdot\left[L_{1-2}\cdot\begin{Bmatrix}1\\1\\0\end{Bmatrix}+L_{2-3}\cdot\begin{Bmatrix}0\\1\\1\end{Bmatrix}+L_{3-1}\cdot\begin{Bmatrix}1\\0\\1\end{Bmatrix}\right]+q_v\cdot\begin{Bmatrix}N_1\\N_2\\N_3\end{Bmatrix}_{\left(\substack{X=X_0\\Y=Y_0}\right)}. \quad (17)$$

Для всей рассматриваемой области:

$$\frac{\partial\Phi}{\partial\{T\}}=\sum_{e=1}^{n}\left(\left[k^{(e)}\right]\cdot\{T\}+\left\{F^{(e)}\right\}\right)=0 \quad (18)$$

или

$$[k]\cdot\{T\}=\{F\}. \quad (19)$$

Таким образом решение задачи, поставленной в (3) сводится к системе алгебраических уравнений (19). Ее решение является третьим этапом алгоритма и выполняется одним из методов, приведенных в [13].

Практическая реализация

Перспективным направлением решения задач теплообмена численными методами является проектирование с использованием современных комплексов инженерного анализа. В отличие от классических способов тепловых расчетов, такие методы позволяют учитывать теплообмен для реальных авиационных конструкций сложных форм в широком диапазоне режимов и условий полета с учетом многих факторов.

Для исследования теплообменных процессов в настоящее время существует множество средств моделирования тепловых режимов: Flomerics Flotherm, ANSYS Icepack и др. В данной работе был выбран программный модуль Flow Simulation, интегрируемый в систему SolidWorks (№ 20-WB43). Полная интеграция Flow Simulation в SolidWorks дает возможность моделировать геометрию и выполнять все расчеты и анализы «в одном окне». Это значительно снижает вероятность возникновения ошибок импорта/экспорта геометрии через промежуточный формат данных. Также для решения задач теплопроводности в SolidWorks реализованы алгоритмы метода конечных элементов [14]. Тем не менее точность аппроксимации решения дифференциальных уравнений теплопроводности, то есть насколько достоверно она отражает физическую реальность, остается важной в процессе исследования температурного поля контейнера. Точность результатов в значительной мере зависит от того, насколько хорошо задача моделирования изначально поставлена путем определения граничных условий для каждого конкретного случая, включая свойства материала и тепловые нагрузки.

С помощью программного модуля SolidWorks Flow Simulation проведено моделирование процесса стабилизации температуры блоков контейнера БКО «Талисман» во всем диапазоне полета самолета Су-30СМ. Для этого в решателе SolidWorks Flow Simulation заданы необходимые настройки для внешнего обтекания тела, а также высота и число М полета, тем самым модель контейнера виртуально помещена в воздушный поток, с соответствующими условиям полета (*рис. 3*).

Точность решения сложных задач методом конечных элементов во многом зависит от качества сетки *К*. Так, при одинаковых заданных условиях значение температуры блока 1, рассчитанное в сетке первого уровня составляет 139 °С, а на третьем уровне — 84 °С. С увеличением *К* сетки время решения каждой задачи значительно увеличивается. Например, для моделирования температурного состояния контейнера в полете на высоте 2 000 м при М = 1,2 на первом уровне начальной сетки *К* = 1 в автоматическом режиме потребовалось 38 минут, а на среднем уровне *К* = 3 необходимо 11 часов 35 минут. Такое время расчета обусловлено сложной геометрией контейнера, допол-

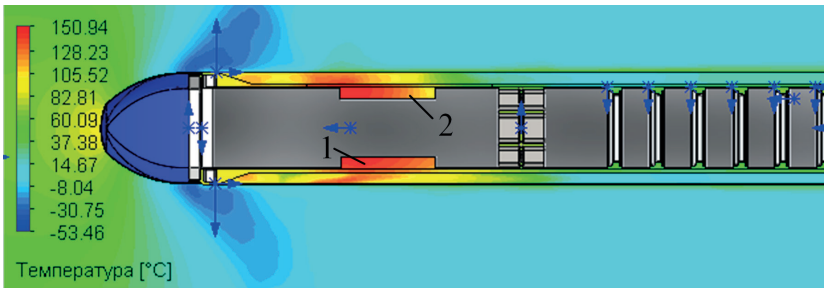


Рис.3. Моделирование работы контейнера «Талисман» в полете при H = 2000 м и М = 1,2

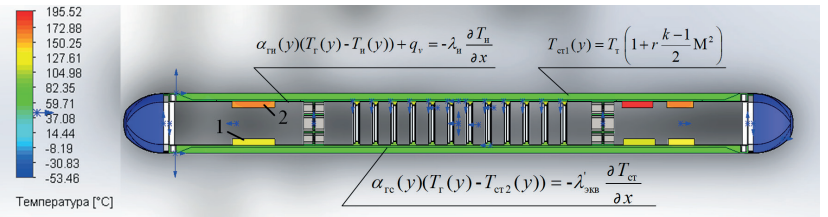


Рис.4. Решение системы дифференциальных уравнений (3) с граничными условиями, соответствующими Н = 2000 м и М = 1,2

нительными тепловыми источниками, условиями охлаждения блоков, а также расчетами сверхзвукового воздушного потока. Для исследования температурного поля во всем диапазоне полета самолета данным способом потребуется около месяца непрерывных расчетов. Дальнейшее повышение К приводит к сбою программы по причине недостаточной мощности процессора (процессор intel core I-5, тактовая частота при расчетах 4,3 МГц).

В целях оптимизации процесса исследования предлагается решить систему дифференциальных уравнений (3), заменяя расчет сверхзвукового обтекания граничными условиями $T_{ст1}$, а процесс охлаждения блоков — коэффициентами теплоотдачи $\alpha_{гс}$, $\alpha_{ги}$, соответствующих заданным условиям полета и рассчитываемых с использованием критериев подобия [3] (*рис. 4*). Для этого применяются настройки решателя для внутреннего расчета и задаются необходимые граничные условия.

Так, расчет температурного поля контейнера в полете на высоте 2 000 м при М = 1,2 на уровне начальной сетки K = 1 в автоматическом режиме с граничными условиями (3) длился 1 минуту, а температура блока 1 составила 110 °С. При K = 3 необходимо 14 минут, что в 46 раз повышает производительность расчетов. Температура блока 1 в данном случае составила 83 °С, что увеличивает точность расчетов на 1,2 % ближе к установившемуся значению.

Таким образом, сравнение результатов моделирования процесса стабилизации температуры блоков контейнера и решения системы уравнений (3) показало, что повышение сетки до K = 3 дает максимальную сходимость, с разницей в 1 °С (*рис. 5*). Дальнейшее улучшение сетки не приводит к изменению значений температуры на блоках контейнера, а лишь увеличивает время расчетов.

Сходимость результатов на определенном уровне настройки сетки определяет достаточность ее качества для расчетов. Таким образом, точность расчетов в пакетах систем автоматизированного проектирования в большей степени зависит от постановки задачи (граничных условий) и выбора сетки, поэтому решение для моделирования, представляющее более простые в использовании возможности, обычно дает более точные результаты [15].

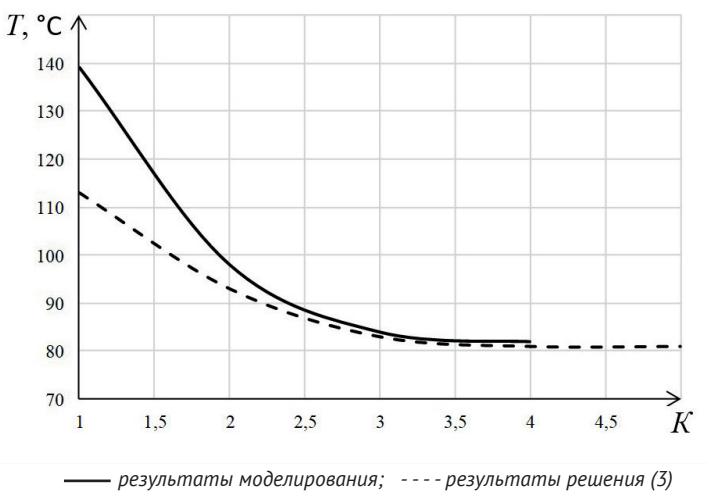


Рис.5. Сравнение результатов моделирования процесса стабилизации температуры блоков контейнера с решением системы уравнений (3)

Заключение

Разработан способ расчета температурного поля элементов конструкции авиационного контейнера, основанный на математической модели, представляющей собой систему дифференциальных уравнений, решаемую методом конечных элементов, учитывающей влияние кинетического нагрева, условий охлаждения и мощности внутренних источников тепла в стационарной постановке задачи. Практическая реализация данного способа показала увеличение точности расчетов на 1,2 % при повышении производительности в 46 раз. Данные результаты позволяют использовать для подобных расчетов ЭВМ производительностью среднего класса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Леньшин, А. В. Бортовые комплексы радиоэлектронной борьбы: учебное пособие / А. В. Леньшин. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2016. – 420 с.
2. Косицын, А. В. Анализ факторов, влияющих на степень нагрева авиационного контейнера / А. В. Косицын, И. А. Потапов // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2020. – № 1 (66). – С. 73-179.
3. Юдаев, Б. Н. Теплопередача / Б. Н. Юдаев. – М. : Высшая школа, 1981. – С. 28.
4. Потапов, И. А. Математическая модель температурного поля контейнера съемного оборудования воздушного судна с внутренними источниками тепла / И. А. Потапов, А. В. Косицын // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2021. – № 2 (71). – С. 81-88.
5. Крэйт, Ф. Основы теплопередачи / Ф. Крэйт, У. Блэк; пер. с англ. – М. : Мир, 1983. – 320 с.
6. Коздоба, Л. А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности / Л. А. Коздоба. – М. : Машиностроение, 1975. – 280 с.
7. Коннор, Дж. Метод конечных элементов в механике жидкости / Дж. Коннор, К. Бреббина; пер. с англ. – Л. : Судостроение, 1979. – С. 12-45.
8. Румянцев, А. В. Метод конечных элементов в задачах теплопроводности / А. В. Румянцев. – Калининград, 1995. – С. 7-10.
9. Синицын А. К. Современные информационные технологии. Проекционно-сеточные методы решения уравнений математической физики: конспект лекций для аспирантов и магистрантов БГУИР / А. К. Синицын. – Минск : БГУИР, 2004. – 60 с.
10. Метод конечных элементов в решении задач теплопроводности / С. А. Подгорный и др. // Вестник ВГУИТ, Кубанский гос. технол. ун-т – 2013. – № 2. – С. 10-15.
11. Стренг, Г. Теория метода конечных элементов / Г. Стренг, Дж. Фикс; пер. с англ. – М.: Мир, 1977. – С. 279-291.
12. Решение двумерной задачи теплопроводности методом конечных элементов в MATHCAD / сост. Л. М. Иванников. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2011. – 350 с.
13. Гантмахер, Ф. Г. Теория матриц / Ф. Г. Гантмахер. – М: Наука, 1968. –567 с.
14. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский и др. — СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – С. 22-28.
15. Андреанов, С. Точность моделирования определяется не только ме-тодом конечных элементов, который лежит в основе всех вычислений / С. Андреанов // САПР и графика. – 2021. – № 4. – С. 54-56.

REFERENCES

1. Len'shin, A. V. Airborne electronic warfare systems: textbook / A. V. Len'shin. – Voronezh: VUNTS VVS "VVA", 2016. – 420 p.
2. Kositsyn, A. V. Analysis of factors influencing the degree of heating of an aviation container / A. V. Kositsyn, I. A. Potapov // Vestn. Military acad. Rep. Belarus. – 2019. – No. 4 (65). – P. 118-127.
3. Yudaev B. N. Heat transfer / B. N. Yudaev. – M. : Higher School, 1981. – P. 28.
4. Potapov, I. A. Mathematical model of the temperature field of an aircraft removable equipment container with internal heat sources / I. A. Potapov, A. V. Kositsyn // Vestn. Military acad. Rep. Belarus. – 2021. – No. 4 (65). – P. 118-127.
5. Krayt F. Fundamentals of heat transfer / F. Krayt, U. Black. – M. : Mir, 1983. – 320 p.
6. Kozdoba, L. A. Methods for Solving Nonlinear Problems of Heat Conduction / L. A. Kozdoba. – M. : Mashinostroenie, 1975. – 280 p.
7. Connor J. Finite element method in fluid mechanics / J. Connor, K. Brebbina. – L .: Shipbuilding, 1979. – P. 12-45.
8. Rumyantsev, A. V. Finite Element Method in Heat Conduction Problems: Uchebn. Allowance / A. V. Rumyantsev. – Kaliningrad. 1995. – P. 7-10.
9. Sinitsyn, A. K. Modern information technologies. Projectiongrid methods for solving equations of mathematical physics: Lecture notes for graduate students and undergraduates of BSUIR / A. K. Sinitsyn. – Minsk: BSUIR, 2004. – P. 60.
10. Podgorny, S. A. Finite element method in solving problems of heat conduction / S. A. Podgorny, Z. A. Meretukov, E. P. Koshevoy, V. S. Kosachev // Vestnik VGUIT, Kuban State University. technol. University. 2013. – № 2. – P. 10-15.
11. Streng G., Fix J. Theory of finite element method / G. Streng, J. Fix. – M .: Mir, 1977. – P. 279-291.
12. Solving the two-dimensional problem of heat conduction by the finite element method in MATHCAD / comp. L. M. Ivannikov. – Khabarovsk: Pacific Publishing House. state un-ta, 2011. – P. 5.
13. Gantmakher, F. G. Matrix theory / F. G. Gantmakher. – M: Nauka, 1968. –567 p.
14. Solidworks. Computer modeling in engineering practice / A. A. Al-yamosky [et al.]. – St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2008. – P. 22-28.
15. Andreanov, S. Modeling accuracy is determined not only by the finite element method, which underlies all calculations / S. Andreanov // CAD and Graphics. 2021. – № 4. – P. 54-56.

Статья поступила в редакцию
18.04.2022

УДК 656.078

А.А.ШЕГИДЕВИЧ, З.В.МАШАРСКИЙ

ПРОЯВЛЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА У АВИАПАССАЖИРОВ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ПОЛЕТА НА ВОЗДУШНОМ СУДНЕ

Артем Артурович Шегидевич *– кандидат технических наук, ректор учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь*
sh_a.bgaa@tut.by

Artem Shegidevich *– Candidate of Technical Sciences, Rector of Belarusian State Academy of Aviation, Repablic of Belarus*
sh_a.bgaa@tut.by

Захар Владимирович Машарский *– кандидат психологических наук, декан факультета гражданской авиации учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь*
aviabsaanir@gmail.com

Zakhar Masharsky *– Candidate of Psychological Sciences, Dean of the Faculty of Civil Aviation of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus*
aviabsaanir@gmail.com

Аннотация: *воздушный транспорт является отраслью, связанной с повышенной опасностью. Осознание этого и само нахождение на борту воздушного судна накладывает отпечаток на поведение авиапассажира. Задача кабинного экипажа максимально снизить негативное воздействие авиаперелета на психологическое состояние пассажиров. В статье рассмотрены требования к поведению пассажиров на борту самолета, проанализированы причины неадекватного поведения и применяемые меры по предотвращению неадекватного поведения пассажиров. Предложено для решения проблемы разработать и принять единый международный нормативный документ, регулирующий поведение пассажиров на борту воздушного судна и аэропортах.*
Ключевые слова: *авиапассажир, кабинный экипаж, воздушное судно, командир воздушного судна, человеческий фактор.*

Abstract: *air transport is an industry that is associated with increased risk. This awareness and the presence on Board of an aircraft affects the behavior of the passengers. The task of cabin crew to minimize the negative impact of air travel on psychological well being of passengers. The article considers the requirements for the behavior of passengers on board the aircraft, analyzes the causes of inappropriate behavior and the measures used to prevent inappropriate behavior of passengers. It is proposed to develop and adopt a single international regulatory document regulating the behavior of passengers on board an aircraft and airports to solve the problem.*
Keywords: *aviapassengers, cabin crew, aircraft, commander aircraft, fear of flying.*

Авиация – это наиболее стремительно развивающийся вид транспорта. Спрос на воздушные перевозки достиг беспрецедентных масштабов. Учитывая, что каждый день все больше людей используют воздушный транспорт, вполне можно ожидать, что на борту воздушных судов будет возникать все больше инцидентов, связанных с недисциплинированным и нарушающим порядок поведением. Данные действия связаны с нападениями на членов экипажа и пассажиров, драками между пассажирами, находящимися в состоянии интоксикации, отказом прекратить курение или употребление спиртных напитков, несанкционированным использованием электронных устройств, разрушением бортового оборудования и прочими нарушающими общественный порядок поступками. Последствия таких действий могут создавать угрозу безопасности выполнения полета,

жизни лиц, находящихся на борту воздушного судна, быть причиной нарушения плана полета, необоснованных затрат на внеплановую (вынужденную) посадку и т.д. Беспрецедентный рост такого рода инцидентов в последнее время вполне объяснимо вызывает тревогу у мирового авиационного сообщества. В контексте международной организации гражданской авиации термин «недисциплинированный или нарушающий порядок пассажир» всегда использовался в отношении пассажиров, не соблюдающих правила поведения на борту воздушных судов или не выполняющих указания членов экипажа и тем самым нарушающих порядок и дисциплину на борту воздушных судов. Учитывая международно-правовые нормы, опыт российских и иностранных авиакомпаний, законодательные инициативы, а также результаты научных исследований, необходимо использовать комплексный институциональный подход к решению проблемы «недисциплинированных пассажиров» [1].

Требования к поведению пассажиров на борту самолета

При попадании на борт самолета авиапассажир должен соответствовать ограниченному набору норм поведения. Очень важно, чтобы у пассажира было общее представление о полномочиях сотрудников авиакомпаний, с которыми он был бы согласен. Помимо того, что пассажиры должны пройти через все реальные сложности, присущие современной авиации, от них еще ожидается, что они должны знать обо всех процедурах проверки пассажиров, выполнять все правила безопасности и различные положения авиакомпаний, быть внимательны во время инструктажей по безопасности, не поддаваться страху в процессе полета, не курить, не употреблять алкогольные напитки, не испытывать стресса, усталости или неудобств физического характера. Ожидается, что в аварийной ситуации они покинут воздушное судно по инструкции оперативно и без предварительного обучения и сделают это даже после того, как пролетят несколько часовых поясов, зажатые в тесных сидениях.

Растущее число нарушающих общественный порядок пассажиров гражданских воздушных судов способствует повышению угрозы летной и авиационной безопасности на воздушном транспорте, а поскольку число пассажиров продолжает расти, растет также и число пассажиров-нарушителей.

Имеются многочисленные факторы, которые, предположительно, содействуют повышению числа нарушений порядка пассажирами. К этим факторам относятся:

- *более полные и систематические сообщения авиакомпаний об инцидентах;*
- *более широкий охват этих инцидентов средствами массовой информации;*
- *стресс (например, боязнь полета, обстановка в аэропорту);*
- *употребление алкоголя/химических препаратов (включая лекарственные препараты);*
- *недостаток никотина/кислорода;*
- *ограниченность физического пространства;*
- *психологическое восприятие ограниченного пространства;*
- *умственная/физическая усталость;*
- *несоответствие образов рекламы с реальностью коммерческого полета и факторы общественного характера;*
- *несоответствующие реальности ожидания, связанные с получением удовлетворения от мгновенного обслуживания.*

Число происшествий может возрастать и в результате страхов. Страх от полета охватывает довольно большую часть авиапассажиров, и этому также часто сопутствуют другие страхи. Исследования в авиакомпаниях показало, что 55 % пассажиров, переживающих страх от полета, также подвержено акрофобии (страх высоты), 46 % страдает клаустрофобией (боязнь замкнутого пространства) и 4 % — агорафобией (страхом открытого пространства). Другое исследование показывает, что 41 % испытывающих страх авиапассажиров также страдает от сильного волнения, а 51 % пассажиров подвержено приступам паники. По результатам тех же исследований видно, что 65 % испытывающих страх авиапассажиров принимали алкоголь или наркотики до и в течение полета, чтобы справиться со своими страхами. Очень важно отметить, что степень взволнованности возрастает у охваченного страхом полета индивидуума, когда он сталкивается с ситуациями, вызывающими еще большее волнение (например, задержка прилета/вылета, посадки) [2].

Причины неадекватного поведения пассажиров

Причины неадекватного поведения пассажиров на борту самолета могут быть классифицированы по степени значимости:

1. *Принятие алкоголя;*
2. *Требовательный или нетерпимый характер пассажира;*
3. *Повышенные меры авиационной безопасности и ограничения при прохождении спецдосмотра в аэропортах;*
4. *Задержки рейсов;*
5. *Усталость от полета;*
6. *Запрещение курения;*
7. *Стесненные условия в пассажирском салоне;*
8. *Запрет на пронос ручной клади;*
9. *Завышенные ожидания уровня обслуживания на борту воздушного судна;*
10. *Неправильное решение проблемы экипажем;*
11. *Отказ в переводе в салон более высокого класса* [1].

Пассажиры в состоянии алкогольного опьянения проявляют агрессивность по отношению к другим пассажирам и кабинному экипажу, доходящую иногда до физического насилия.

Более редким, но столь же проблематичным является нарушение пассажиром общественного порядка в результате злоупотребления психотропными средствами. Стимулирующие и успокоительные средства и наркотики в различных видах влияют на эмоции и поведение. Неспокойное, возбужденное, оскорбительное, грубое и даже психически неустойчивое поведение может возникать в результате принятия слишком большой дозы стимулирующих средств, тогда как чрезмерная доза успокоительных лекарств может привести к потере сознания. Также происходят сложные взаимодействия химических препаратов с алкоголем [3].

Меры по предотвращению неадекватного поведения пассажиров

Исследования неадекватного поведения демонстрируют, что цепь мелких событий может перейти на более высокий уровень, но имеется возможность заметить первые сигналы потенциально неадекватного поведения. Следует обратить особое внимание на предотвращение неадекватного поведения, реагировать на первые вызывающие тревогу сигналы и не допускать возникновения инцидента. Для предотвращения подобных случаев авиакомпании могут принимать соответствующие меры. Международная ассоциация воздушного транспорта рекомендует меры организации как внутреннего, так и внешнего характера [4].

Внутренние меры организации представляют собой следующее:

1. *Предоставление персоналу четких положений политики авиакомпании, позволяющих успокоить пассажира, нарушающего общественный порядок, в особенности на ранних этапах проявления;*
2. *Обеспечение приятного полета: устранение состояния неудовлетворенности, которое возникает за долгие часы ожидания, в результате большого числа перевозимых пассажиров, отсутствия информации, технических трудностей и т. д.;*
3. *Обеспечение подготовки персонала авиакомпании:*
   - *инструктаж наземного персонала и экипажей (летного и кабинного) с целью обучить их распознаванию первых проявлений потенциально неадекватного поведения;*
   - *обучение тех, кто входит в непосредственный контакт с пассажирами-нарушителями;*
   - *выработка навыков ведения необходимого диалога и понимания важного значения передачи информации другим оперативным службам для обеспечения эффективной работы с пассажирами в подобной ситуации.*
4. *Надлежащая подготовка и обновление докладов и статистических данных об имевших место инцидентах с целью постоянного контроля типов инцидентов и выявления потенциальных потребностей в плане обучения* [5].

К внешним мерам относятся элементы общения с пассажирами следующего характера:

1. *До посадки на борт, в аэропорту, на стойках регистрации, при прохождении спецдосмотра, таможенного и пограничного контроля;*
2. *С помощью информационных карточек конкретной тематики, размещенных в аэропорту и на борту воздушного судна в кармане переднего сидения;*
3. *С помощью информации, напечатанной на авиабилете или электронном чеке* [6].

Неадекватное поведение авиапассажиров часто приводит к возникновению конфликтов на борту воздушного судна. Конфликты возникают от восприятия несовместимых потребностей или целей и от невозможности или неспособности сделать их совместимыми. В настоящее время все больше авиакомпаний сообщают об инцидентах, связанных с поведением пассажиров.

За последние годы доклады о «поведении неуправляемых пассажиров» стали более частыми с широким разнообразием антисоциального поведения, которое переходит от вербального оскорбления до физического насилия. Многие из этих инцидентов имели влияние на осуществление полетов: рейсы отменялись, прибытие воздушного судна задерживалось, что создавало неудобства для пассажиров, которые пропускали стыковки. Имели место случаи вынужденной посадки воздушного судна из-за агрессивного, неуправляемого поведения пассажиров на борту.

Конфликты могут принимать разные формы: некоторые могут быть решены посредством обсуждения и найденного удовлетворительного решения без дальнейших последствий. Тем не менее, когда конфликт становится враждебным, на него нужно немедленно отреагировать. Если конфликт произошел до вылета, то его надо решить на земле. По мере развития конфликта, общение ухудшается, и конфликт становится разрушительным и неуправляемым. На этом этапе у людей, вовлеченных в конфликт, может развиться острый (внезапный) стресс, который влияет на выполнение обязанностей [7, 8].

При разрешении пассажирского конфликта экипаж может использовать следующие стратегические меры:

- *внимательно выслушать пассажира и быть с ним отменно вежливым, но настойчивым;*
- *разобраться в причинах конфликта, сохраняя вместе с тем профессиональное отношение к делу;*
- *сконцентрировать внимание на том, что правильно, а не на том, кто прав;*
- *не воспринимать все лично;*
- *предложить решение, гарантирующее безопасность;*
- *обеспечить безопасность пассажирского салона;*
- *следует информировать летный экипаж о возникшем конфликте и привлечь его на помощь, если необходимо;*
- *резко прекратить конфликт, если безопасность в салоне находится под угрозой* [3, 9].

Вот пример поведения пассажира, ставшего источником конфликта на борту воздушного судна между пассажиром и членами экипажа, которые выполняли процедуры, связанные с безопасностью: «Пассажир не отключил мобильный телефон по просьбе бортпроводника, после того, как командир воздушного судна сделал сообщение: «Подготовиться к взлету». Другие пассажиры стали требовать, чтобы пассажир отключила телефон, на что женщина в ответ стала кричать, словесно оскорблять экипаж и пассажиров». Конфликт возник в результате несогласия пассажира с правилом авиационной безопасности и вмешательством в выполнение бортпроводником своих обязанностей. Конфликт возник в связи с несовместимыми целями. Цель пассажира — желание продолжать использовать телефон, зная, что это запрещено. Цель экипажа — обеспечить безопасность полета, требуя от пассажира подчинения авиационным правилам.

Многие авиационные власти по всему миру вводят очень строгие правила, касающиеся поведения пассажиров, и четко определяют тип поведения, который является «недопустимым». Эти правила также являются для членов экипажа

ресурсом, позволяющий определить тип поведения, который несет угрозу безопасности полета, значительно снизить число нарушающих общественный порядок пассажиров гражданских воздушных судов, способствуя повышению уровня авиационной безопасности в отрасли [9, 10].

Ниже приводится выдержка из документа государственного авиационного органа Великобритании (Air Navigation Order (ANO) 2000, United Kingdom) [11]:

«...63. Пассажир не должен безответственными или необдуманными действиями подвергать опасности воздушное судно, или любое лицо, находящееся на борту воздушного судна.

64. Пассажир не должен безответственными или необдуманными действиями наносить вред воздушного судна и имуществу других людей.

65. Любому лицу, находящемуся в состоянии алкогольного опьянения запрещено заходить на борт воздушного судна. Распитие спиртных напитков на борту воздушного судна воспрещено.

66. Пассажирам запрещено курить в салоне воздушного судна, зарегистрированного в Великобритании, если в салоне воздушного судна имеются запрещающие курение знаки или если запрет на курение исходит от командира воздушного судна или члена экипажа воздушного судна.

67. Лица, находящиеся на борту воздушного судна должны безусловно выполнять указания командира воздушного судна, касающиеся безопасности полета, безопасности людей, находящихся на борту воздушного судна и сохранности собственности авиакомпании.

68. Любому лицу, находящемуся на борту воздушного судна:

- *запрещено использовать угрожающие или оскорбительные слова и выражения по отношению к любому члену экипажа воздушного судна;*
- *запрещено допускать агрессивные, угрожающие или оскорбительные действия по отношению к любому члену экипажа воздушного судна;*
- *запрещено препятствовать исполнению членами экипажа своих служебных обязанностей...»* [4].

Некоторые признаки неадекватного поведения пассажиров могут быть замечены сотрудниками авиакомпании или аэропорта на стадии прохождения процедур регистрации, спецдосмотра, в зале отлета. Все службы аэровокзального комплекса, входящие в контакт с пассажирами (сотрудники службы авиационной безопасности, таможенного и пограничного контроля, представители авиакомпании и т.д.) должны осознавать, что неадекватно ведущие себя пассажиры представляют собой реальную угрозу безопасности полета. Авиакомпании должны четко определять приемлемые правила поведения пассажиров на борту воздушного судна и процедуры отказа в перевозке в отношении неадекватных лиц с целью сохранения высокого уровня безопасности полетов [12].

Заключение

Тенденция роста случаев деструктивного поведения пассажиров на борту воздушного судна превращает их в реальную угрозу для безопасности полетов. Тем не менее, должного внимания обозначенной проблеме не уделяется, что подтверждается отсутствием в гражданской авиации единого комплексного подхода к регулированию проблемы деструктивного поведения пассажиров на борту воздушного судна. Для решения проблемы актуальной представляется разработка единого международного нормативного документа, регулирующего принципы профилактики деструктивного поведения пассажиров на борту воздушного судна и аэропортах. Документ должен включать унифицированные нормы, в равной мере актуальные для каждого государства. Разработка и принятие подобного документа обеспечит единый подход к решению проблемы и позволит повысить уровень правового обеспечения в рассматриваемой области.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Козлов, В. В. Человеческий фактор: история, теория и практика в авиации / В. В. Козлов // М., 2002. – С. 112-125.
2. Козлов, В. В. Человеческий фактор в условиях перехода к управлению безопасностью полетов / В. В. Козлов // М., 2007. – С. 74-83.
3. Овчаров, В. Е. Человеческий фактор в авиационных происшествиях (методические материалы) / В. Е. Овчаров // М. – 2005.
4. Блэк Л., Маккейб Д. Внедрение новой системы управления и организации труда в английской компании // Проблемы теории и практики управления. – 2011. – №1. – С. 78-82.
5. Human Factors Acquisition Job Aid. Federal Aviation Administration. Human Factors Division, ANG-C1, July 2013. –120 p.
6. Алахвердова, Ю. Г. Обучение персонала ФГУП «Госкорпорация по ОрВД» в области человеческого фактора: возможности и перспективы / Материалы I научно-практич. конф., посвященной 95-летию гражданской авиации России (6-7 февраля 2018 г.). – М., 2018. – С. 54-57.
7. Козлов, В. В. Безопасность полетов: от обеспечения к управлению. – М.: ОАО «Аэрофлот – российские авиалинии», 2010. – 270 с.
8. Евстигнеев, Д. А. Авиационная психология и человеческий фактор. – Ульяновск: УВАУ ГА, 2005. – 103 с.
9. Лысаков, Н. Д. Динамика развития имиджа авиатора / Н. Д. Лысаков, Е. Н. Лысакова // Психология обучения. – 2018. – № 2. – С. 57-63.
10. Психология труда, инженерная психология и эргономика / Под ред. Е. А. Климова, О. Г. Носковой, Г. Н. Солнцевой. – М.: Юрайт, 2016. – 529 с.
11. Руководство по обучению в области человеческого фактора, Doc9683, Издание первое – ICAO, 1998 – 370 с.
12. Рыбалкин, В. В.Человеческий фактор и психология безопасности / В. В. Рыбалкин, А. Л. Рыбалкина // М.: МГТУ ГА, 2014. – 36 с.

REFERENCES

1. Kozlov, V. V. The human factor: history, theory and practice in aviation / V. V. Kozlov // M.: Polygraph, 2002, – P. 112-125.
2. Kozlov, V. V. The human factor and the flight safety system / V. V. Kozlov // Scientific Bulletin of MSTU GA. – 2012. – No. 182. – P. 84-88.
3. Ovcharov, V. E. The human factor in aviation accidents (methodological materials) / V. E. Ovcharov // M .: Polygraph, 2005. – 78 p.
4. Black L., McCabe D. Implementation of a new management system and labor organization in an English company // Problems of management theory and practice. – 2011. – No. 1. – P. 78-82.
5. Human Factors Acquisition Job Aid. Federal Aviation Administration. Human Factors Division, ANG-C1, July 2013. –120 p.
6. Alakhverdova Yu. G. Training of personnel of FSUE "State ATM Corporation" in the field of the human factor: opportunities and prospects / Materials I scientific and practical. Conf., dedicated to the 95th anniversary of Russian civil aviation (February 6-7, 2018). – M.: Yurayt, 2018. –P. 54-57.
7. Kozlov, V. V. Flight safety: from support to management. – M .: JSC Aeroflot – Russian Airlines, 2010. – 270 p.
8. Evstigneev, D. A. Aviation psychology and the human factor. - Ulyanovsk: UVAU GA, 2005. – 103 p.
9. Lysakov, N. D. The dynamics of the development of the aviator's image / N. D. Lysakov, E. N. Lysakova // Psychology of education. – 2018. – No. 2.– P. 57-63.
10. Labor psychology, engineering psychology and ergonomics / Ed. E. A. Klimova, O. G. Noskova, G. N. Solntseva. – M .: Yurayt, 2016. –529 p.
11. Human Factors Training Manual, Doc9683, First Edition – ICAO, 1998. – 370 p.
12. Rybalkin, V. V., Rybalkina A. L. Human Factors and Safety Psychology. – M .: MGTU GA, 2014. –36 p.

Статья поступила в редакцию
30.11.2021

УДК 519.688

А. А. САНЬКО, А. А. ШЕЙНИКОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА БЛОК ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ В ВЕРТИКАЛЬНОМ КАНАЛЕ БЛА

Андрей Анатольевич Санько *– кандидат технических наук, доцент, военнослужающий, учреждение образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь*

Andrei Sanko *– Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Serviceman of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus*

Алексей Александрович Шейников *– кандидат технических наук, доцент, военнослужающий, учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь», Республика Беларусь*

Aliaksey Sheinikau *– Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Serviceman of Military Academy of the Republic of Belarus, Republic of Belarus*

Аннотация: *в статье представлены результаты исследований воздействия ветровых возмущений, действующих на блок чувствительных элементов навигационной системы в вертикальном канале беспилотного летательного аппарата (БЛА). Результаты исследований основываются на использовании разработанной математической модели ветра с учетом его порывистой части и ветра устойчивого направления, действующего на БЛА в связанной системе координат, нелинейной математической модели продольного движения БЛА с учетом влияния основных нелинейностей элементов сервопривода автопилота на его выходной сигнал, а также математических моделей навигационных датчиков БЛА с учетом погрешностей и шумов измерений. Приводится формула аппроксимации среднеквадратического отклонения вычисленной широты места БЛА от условий испытаний с учетом ветровых возмущений. Даются рекомендации по использованию полученной формулы с целью минимизации ошибки по координате.*
Ключевые слова: *гироскоп, акселерометр, погрешности, движущийся объект, параметры Родрига – Гамильтона, алгоритмы ориентации, моделирование, ветер.*

Abstract: *the article presents the results of studies of the impact of wind disturbances acting on the block of sensitive elements of the navigation system in the vertical channel of an unmanned aerial vehicle (UAV). The results of the research are based on the use of the developed mathematical model of the wind, taking into account its gusty part and the wind of a stable direction acting on the UAV in the associated coordinate system, a nonlinear mathematical model of the longitudinal movement of the UAV, taking into account the influence of the main nonlinearities of the autopilot servo drive elements on its output signal, as well as mathematical models of UAV navigation sensors. A formula is given for approximating the standard deviation of the calculated latitude of the UAV site from the test conditions, taking into account wind disturbances. Recommendations are given on the use of the obtained formula in order to minimize the error in the coordinate.*
Keywords: *gyroscope, accelerometer, errors, moving object, Rodrigues-Hamilton parameters, orientation algorithms, modeling, wind.*

В условиях широкого внедрения навигационных датчиков, выполненных по микроэлектромеханической технологии (МЭМС) и имеющих разброс параметров при изготовлении до 3 %, несмотря на их калибровку при изготовлении, а также высокую чувствительность к внешним возмущениям [1, 2], все большую актуальность приобретает проблема повышения точности бесплатформенных инерциально-навигационных систем (БИНС). Воздействия случайных ветровых

возмущений большой величины на датчики БИНС (особенно в горно-степной местности), приводит к случайному изменению проекций кажущегося ускорения, абсолютной угловой скорости и значений углов ориентации БЛА от номинального значения. В этом случае точность работы БИНС по вычислению координат будет ухудшаться.

Постановка задачи

Провести исследования воздействия ветровых возмущений, действующих на блок чувствительных элементов навигационной системы в вертикальном канале беспилотного летательного аппарата (БЛА), с целью получения математической зависимости среднеквадратического отклонения вычисленных координат БЛА от условий полета. Отличительной особенностью проводимых исследований [3, 4], является использование разработанной математической модели ветра с учетом его порывистой части и ветра устойчивого направления, действующего на БЛА в связанной системе координат, нелинейной математической модели контура управления высотой полета БЛА с учетом влияния основных нелинейностей элементов сервопривода автопилота на его выходной сигнал, а также математических моделей навигационных датчиков БИНС с учетом их погрешностей и шумов измерений.

Решение задачи

Разработка математической модели ветра. Допущение

Направление ветра устойчивого направления, совпадает по касательной к направлению полета БЛА (вдоль оси — OY_b). При составлении математической модели, не учитываются: неровности местности; наличия ветра типа — ножницы; другие метеорологические фракции (за исключением высоты).

Суммарный вектор скорости ветра, действующий на БЛА, может быть выражен, как [5]:

$$\overrightarrow{V^{\Sigma}} = \overrightarrow{V_6^i} + \overrightarrow{V^b},$$

где $\overrightarrow{V_6^i}$ — постоянный вектор, который представляет собой ветер устойчивого направления (обычно выражается в инерциальной системе координат (СК) — $OX_iY_iZ_i$). Ось OX_i — направленная в точку весеннего равноденствия, Ось OZ_i — направлена по оси вращения Земли, ось OY_i — образует с осями OX_i и OZ_i правую СК; $\overrightarrow{V^b}$ — стохастический процесс, который представляет собой воздушные порывы и другие атмосферные возмущения (стохастическая компонента ветра выражается в связанной СК — $OX_bY_bZ_b$ или $OX_cY_cZ_c$). Связанную с объектом моделирования СК будем обозначать — $OX_gY_gZ_g$. OY_g — продольная ось объекта, OX_g — поперечная ось объекта (на правый борт), OZ_g — нормальная ось объекта (вверх). Относительно этой СК вместе с Землей вращается и географическая СК (географический сопровождающий трехгранник) — *рис. 1.* Географическая СК — $O\xi\eta\zeta$ (или OENH) направлены так: ось $O\xi$ по касательной к параллели на восток, $O\eta$ направлена на Север, ось $O\zeta$ направлена по вертикали. ω_ξ, ω_η, ω_ζ — проекции переносной угловой скорости на оси географической СК; ω_{xc}, ω_{yc}, ω_{zc} — проекции абсолютной угловой скорости объекта на оси связанной СК; $\dot{\vartheta}$, $\dot{\gamma}$, $\dot{\psi}$ — проекции относительной угловой скорости.

Значение V_6^i для БЛА, можно вычислить, как [6]:

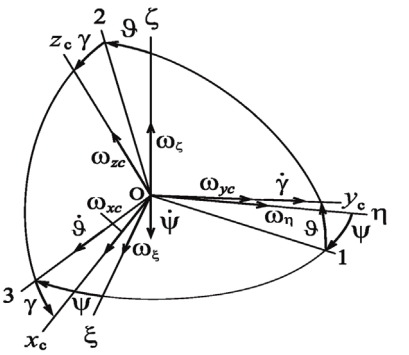


Рис. 1. Система координат

$$V_6^i = V_6 \frac{ln\left(\frac{h}{Z_0}\right)}{ln\left(\frac{6}{Z_0}\right)}, \ (1 \text{ м} < h < 300 \text{ м}),$$

где V_6 — среднегодовая скорость ветра на высоте 6 метров для заданного участка местности; h — текущая высота полета БЛА; Z_0 — коэффициент (для указанных высот, выбирается — 0,1). Например, для Смоленской области — $V_6 \approx 3$ м/с [7].

На средних и больших высотах параметры для модели порывов ветра основываются на предположении, что турбулентность — изотропная. Результаты экспериментальных исследований показали, что адекватность модели для неустановившейся порывистой части ветра достигается при пропускании через линейный, не

Таблица 1. Параметры модели порыва ветра Драйдена

Описание порыва ветра	h, м	L_z, м	σ_z, м
Слабая турбулентность	50	200	1,06
Умеренная турбулентность	50	200	2,12
Слабая турбулентность	600	533	1,5
Умеренная турбулентность	600	533	3

Таблица 2. Уравнения связи σ и L от высоты полета

Слабая турбулентность	Умеренная турбулентность
$\sigma_z(h)$ = 1,02 + 0,008h	$\sigma_z(h)$ = 2.04 + 0,0016h
$L_z(h)$ = 169,727 + 0,605h	

меняющийся во времени фильтр белого шума, задаваемого спектром турбулентности фон Кармана [5]. Для простоты вычисления модели фон Кармана ветра вдоль оси OZ_b, целесообразно использовать передаточную функцию Драйдена:

$$H_z(p)=\sigma_z\sqrt{\frac{3V_a}{L_z}}\frac{\left(s+\frac{V_a}{\sqrt{3}L_z}\right)}{\left(s+\frac{V_a}{L_z}\right)^2},$$

где σ_z — интенсивности турбулентности вдоль оси связанной СК БЛА; L_z — пространственная длинна волны (масштаб турбулентности); V_a — воздушная скорость БЛА, без учета величины ветра устойчивого направления.

Подходящие параметры в случае небольших и средних высот, слабой и умеренной турбулентности представлены в *таблице 1* [5].

Проведенные исследования показали [8], что от 50 м < h < 600 м, существует линейная интерполяция между значениями σ и L от высоты полета БЛА. Полученные уравнения связи σ и L от высоты полета для оси OZ_b имеют вид, представленный в *таблице 2*.

На *рис. 2* представлена математическая модель расчета значений составляющих скорости ветра, действующего на БЛА в связанной СК:

$$C^{ib}=C^{gb}(C^{gi})^T,\quad C^{bi}=(C^{ib})^T,$$

где C^{gb} — матрица направляющих косинусов между осями связанной и географической СК, где: ψ — (угол рысканья); ϑ — (угол тангажа); γ — (угол крена):

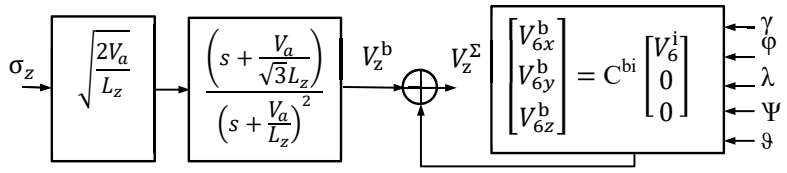


Рис. 2. Математическая модель расчета составляющей скорости ветра по оси OZ_b, действующего на БЛА

$$C^{gb}=\begin{bmatrix} C^{gb}(1,1) & C^{gb}(1,2) & C^{gb}(1,3)\\ C^{gb}(2,1) & C^{gb}(2,2) & C^{gb}(2,3)\\ C^{gb}(3,1) & C^{gb}(3,2) & C^{gb}(3,3)\end{bmatrix},$$

где:

$$C^{gb}(1,1)=cos(\gamma)cos(\psi)+sin(\gamma)sin(\psi)sin(\vartheta);$$
$$C^{gb}(1,2)=cos(\vartheta)sin(\psi);$$
$$C^{gb}(1,3)=cos(\psi)sin(\vartheta)-sin(\psi)cos(\gamma)sin(\vartheta);$$
$$C^{gb}(2,1)=-cos(\gamma)sin(\psi)+sin(\gamma)cos(\psi)sin(\vartheta);$$
$$C^{gb}(2,2)=cos(\vartheta)cos(\psi);$$
$$C^{gb}(2,3)=-sin(\psi)sin(\gamma)-cos(\gamma)cos(\psi)\ sin(\vartheta);$$
$$C^{gb}(3,1)=-cos(\vartheta)sin(\gamma);$$
$$C^{gb}(3,2)=sin(\vartheta);$$
$$C^{gb}(3,3)=cos(\vartheta)cos(\gamma).$$

C^{gi} — матрица направляющих косинусов между осями инерциальной СК и географической СК, где λ — долгота; φ — широта:

$$C^{gi}(1,1)=-sin(\lambda);\quad C^{gi}(1,2)=cos(\lambda);\quad C^{gi}(1,3)=0;$$
$$C^{gi}(2,1)=cos(\lambda)sin(\varphi);\quad C^{gi}(2,2)=sin(\lambda)sin(\varphi);\quad C^{gi}(2,3)=cos(\varphi);$$
$$C^{gi}(3,1)=cos(\lambda)cos(\varphi);\quad C^{gi}(3,2)=sin(\lambda)cos(\varphi);\quad C^{gi}(3,3)=sin(\varphi).$$

Результаты расчета представлены на *рис. 3*. Профиль полета — на *рис. 4*.

Разработка математических моделей навигационных датчиков БЛА с учетом их погрешностей

В качестве измерителей кажущегося ускорения для исследуемого БИНС рассматривались маятниковые МЭМС-акселерометры компенсационного типа [9]. В последнее время такие акселерометры находят широкое применение в современных навигационных системах высокого класса точности [9, 10]. В качестве навигационных датчиков, был выбран блок БЧЭ-400 НПК «ОПТОЛИНК» [10], *таблица 3*.

Линейная модель выходного сигнала трехосного акселерометра, имеет вид [9]:

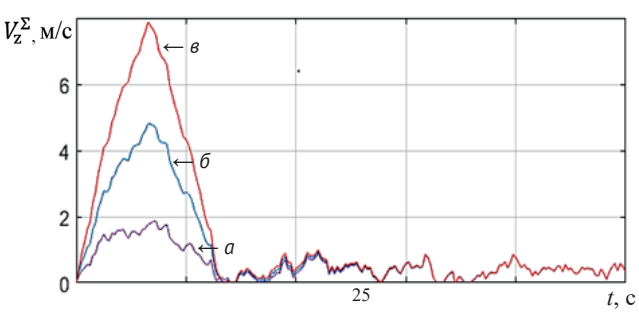


Рис. 3. Составляющая ветра по оси OZ_b, при $V_б$: а – 1 м/с; б – 3 м/с; в – 5 м/с

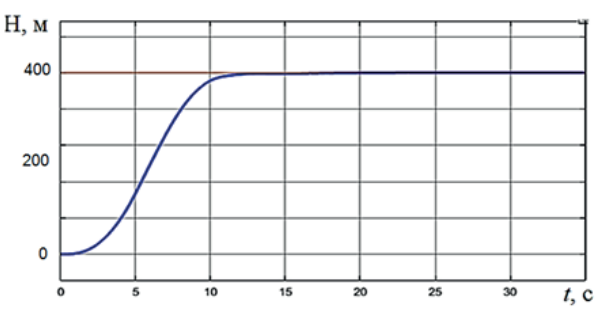


Рис. 4. Профиль полета ($H_{тек}$ = 300 м; $H_{зад}$ = 400 м; $V_б$ = 15 м/с)

Таблица 3. Характеристики погрешностей БЧЭ-400

Гироскопы		Акселерометры	
Диапазон измеряемой угловой скорости, [град/с]	± 495	Диапазон измеряемого ускорения, g	± 10
Случайный дрейф нулевого сигнала при фиксированной температуре, [рад/с]	$5 \cdot 10^{-7}$	Случайный дрейф нуля в запуске, g	0,006 (вариация Аллана)
Систематический дрейф нулевого сигнала при фиксированной температуре, [рад/с]	$1{,}93 \cdot 10^{-8}$ (вариация Аллана)	Погрешность масштабного коэффициента от измеряемой величины, %	0,004
Погрешность масштабного коэффициента, %	0,003	Спектральная плотность мощности шума, [g/√Гц]	$4 \cdot 10^{-6}$
Спектральная плотность мощности шума, [рад/с/√Гц]	$5 \cdot 10^{-8}$		

$$U_{outi} = K_i a_i + U_{di} + N_i,$$

где U_{outi} — значение выходного сигнала акселерометра в размерности напряжения, тока, кода АЦП, частоты или других величин по каналу i-й оси; N — шум акселерометра по каналу i-й оси; K — масштабный коэффициент акселерометра по каналу i-й оси чувствительности (обычно задается в процентах от номинального значения, который будем считать постоянным от запуска к запуску [11]); U_{di} — дрейф нулевого значения сигнала по каналу i-й оси.

При длительной эксплуатации акселерометров будет наблюдаться дрейф нуля двух типов: переменная составляющая (случайный дрейф, который будет отличаться от запуска к запуску для датчиков одного типа) и длительный дрейф. Длительный дрейф в среднем на порядок меньше краткосрочного дрейфа [12]. Следовательно, при составлении математической модели акселерометра будем рассматривать только случайную составляющую дрейфа в запуске. Случайную составляющую дрейфа нуля в запуске связывают с так называемым $1/f$ шумом или фликер шумом, имеющим спектральную плотность обратно-пропорциональную частоте, которая проявляется практически у всех материалов и элементов, используемых в электронике [13]. Фликер шум можно описать винеровским, либо марковским случайным процессом [11]. В последнем случае марковский процесс может быть описан путем пропускания белого шума единичной интенсивности через формирующий фильтр:

$$W(p) \approx \frac{\sigma_{дн}\sqrt{2T_c}}{T_c p + 1}, \qquad (1)$$

где T_c — интервалы корреляции медленно меняющихся случайных смещений нулей акселерометров ($T_c \approx 10\ 000$ с, [9]); $\sigma_{дн}$ — среднеквадратичное отклонение

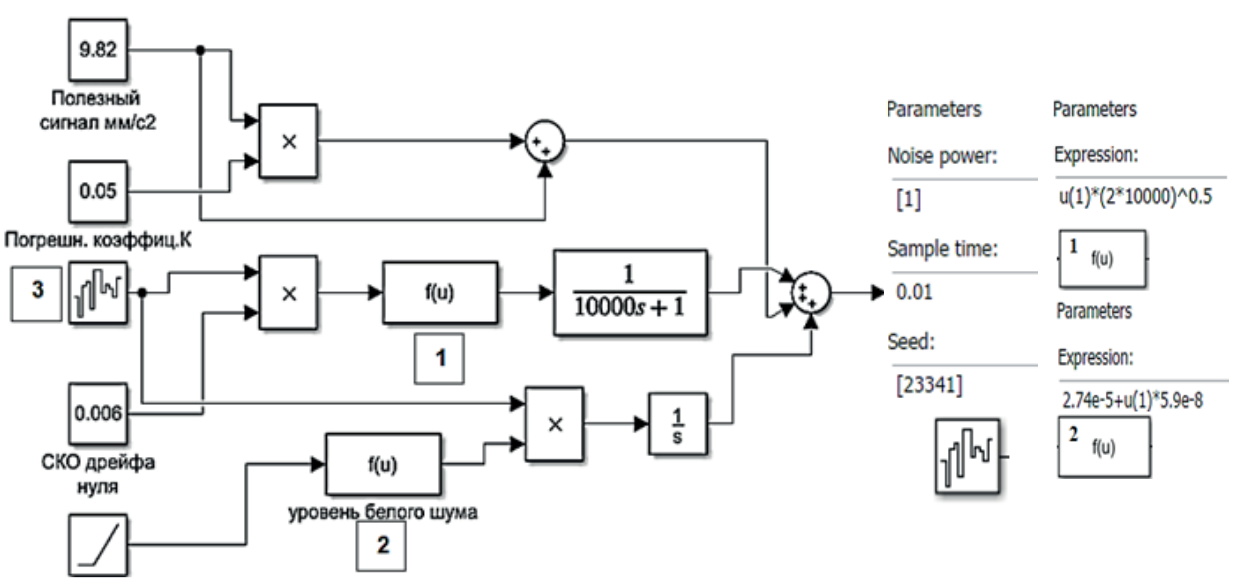


Рис. 5. Математическая модель акселерометра в среде Simulink

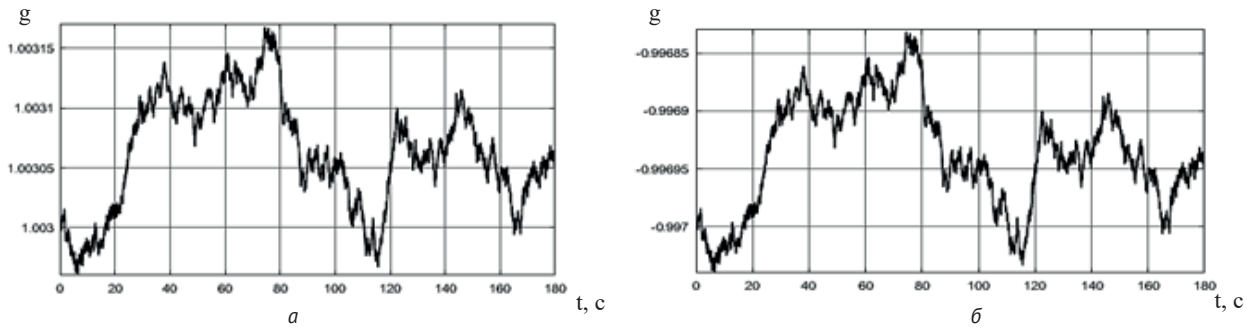


Рис. 6. Выходной сигнал акселерометра с учетом погрешностей измерений и шумов, при:
а) K = + 0,003 %; *б) K* = – 0,003 %

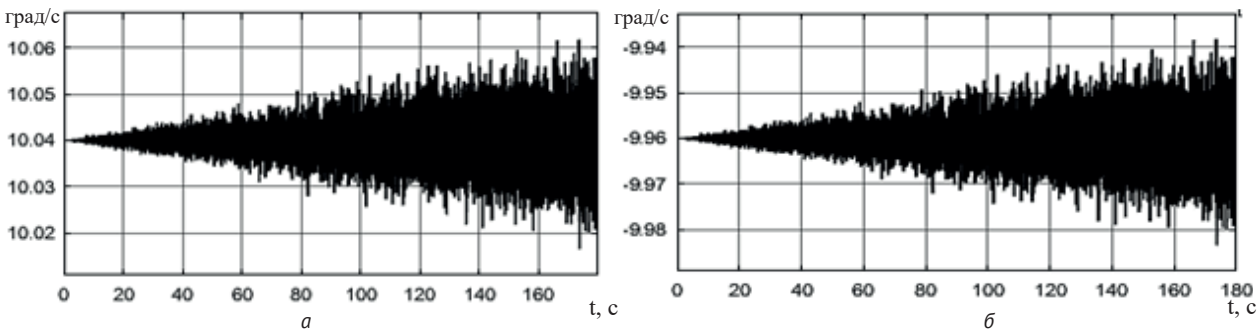


Рис. 7. Выходной сигнал акселерометра с учетом погрешностей измерений и шумов, при:
а) R = + 0,004 %; *б) R* = – 0,003 %

(СКО) случайного дрейфа нуля.

Для характеристики шума акселерометра обычно задается величина *VRW* (*Velocity Random Walk* — случайное блуждание скорости) с размерностью g/√Гц. В упрощенном виде СКО погрешности БИНС по скорости может быть представлено в виде [11]:

$$\sigma_V(t) \approx VRW\sqrt{t}\ ,$$

где $\sigma_V(t)$, можно аппроксимировать в виде полинома:

$$\sigma_V(t) \approx 2{,}74\cdot10^{-5} + 5{,}9\cdot10^{-8}t,$$

где $R^2 = 0{,}95$.

Моделирование влияния случайного дрейфа нуля на выходной сигнал акселерометра осуществлялся путем подачи белого шума заданной мощности, равномерно распределенной по частоте на вход формирующего фильтра (1).

Выходной сигнал гироскопа (ВОГ) содержит мультипликативную и аддитивную погрешности: мультипликативная связана с искажениями масштабного коэффициента, обусловленными температурными факторами; аддитивная — с наличием двух факторов, чувствительных к температуре: сигналом дрейфа нуля и шума [14]. Выходной сигнал ВОГ в общем виде можно представить в виде:

$$U_{outi} = R_i\cdot\omega_i + U_{\omega i} + b_{1i}a_x + b_{12}a_y + b_{13}a_z + N_i$$

где $U_{\omega i}$ — смещения нулей гироскопа, не зависящие от ускорений; ω_i — значения проекций абсолютной угловой скорости на ось чувствительности гироскопа; b_{ij} — коэффициенты чувствительности к ускорениям, так называемый «дрейф от g», для ВОГ гироскопов имеют порядок $10^{-9} - 10^{-10}$.

Для характеристики шума акселерометра обычно задается величина *ARW* (*Angle Random Walk* — случайное блуждание угла) с размерностью 0/√Гц. В упрощенном виде СКО погрешности датчика по угловой скорости, может быть представлено в виде [11]:

$$\sigma_\omega(t) \approx ARW\sqrt{t}\ .$$

Дрейф нуля гироскопа описывается математически, так же как и для акселерометра, но при ($T_c \approx 2000$ с, [9]).

Разработанная математическая модель акселерометра в среде *Simulink*, представлена на *рис. 5*. Выходные сигналы датчиков с учетом погрешностей и шумов измерений, представлены на *рис. 6* и *7*.

Разработка математической модели типового контура управления высотой полета БЛА

Математическая модель контура управления высотой полета БЛА представлена на *рис. 8*, где $\alpha_в$ — угол ветра $\alpha_в \approx V_z^{\Sigma}/V_a$; $K_H = 0{,}038$ — коэффициент усиления контура высоты полета (определяет угол отклонения руля высоты при возникновении рассогласования между значениями текущей и опорной барометрической высоты в 1[м]); K_ϑ — коэффициент передачи по тангажу; $K_{\delta в}$ — коэффициент передачи по рулю высоты; T_θ — постоянная времени, характеризующая маневренность БЛА в продольном канале; T_α — постоянная време-

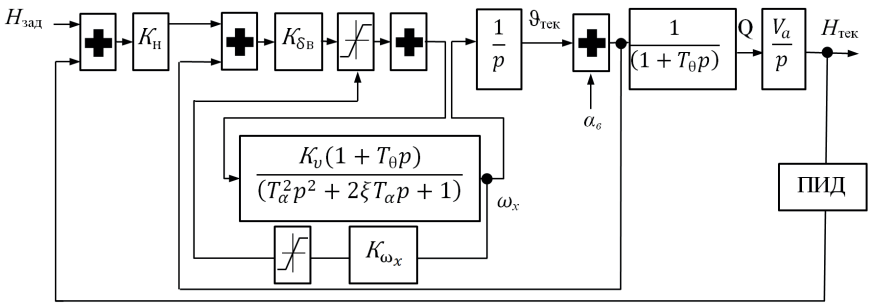


Рис. 8. Математическая модель контура управления высотой полета БЛА

ни собственных колебаний БЛА; $K_{\omega x}$ — коэффициент, характеризующий угол отклонения руля высоты на единицу угловой скорости ω_x; ξ — коэффициент демпфирования.

Значения коэффициентов, при условиях полета — $H_{тек}$ = 300 м; V_a = 15.

Постоянная времени T_α=0,028 с:

$$T_\alpha = \sqrt{\frac{J_x}{V_a^2 q S_{кр} x_F C_x^\alpha}}$$

где C_x^α — коэффициент подъемной силы

$$C_x^\alpha = C_x^\alpha(\alpha) + C_x^{рв}\delta_{рв}$$

где $C_x^\alpha(\alpha)$ — приращение коэффициента подъемной силы от угла атаки; $C_x^{рв}$ — производная коэффициента подъемной силы по углу отклонения руля высоты ≈0,01); $\delta_{рв}$ — угол отклонения руля высоты; x_F — расстояние от точки приложения подъемной силы до ЦМ БЛА (0,4 м); $S_{кр}$ — площадь крыла (4 м^2); J_x — момент инерции БЛА относительно оси OX_a — (10 кгм^2).

Скоростной напор q:

$$q = 0{,}5 P_н V_a^2,$$

где $P_н$ — абсолютное статическое давление.

Коэффициент ξ = 1,04, [15, 16]:

$$\xi \approx \frac{Z+P}{2mV_a}\sqrt{\frac{J_x}{x_F C_y^\alpha q S_{кр}}}$$

где $Z = C_x^\alpha q S_{кр}$ — подъемная сила по оси OZ_a скоростной СК (141,6 кгс); m — масса БЛА (22 кг); P — тяга двигателя (22,6 кгс).

Постоянная времени T_θ = 1,52 с, при:

$$T_\theta = \sqrt{\frac{2m}{C_x^\alpha S_{КР} \rho V_a}}.$$

Коэффициент $K_н$, выбирался исходя из условия [17]:

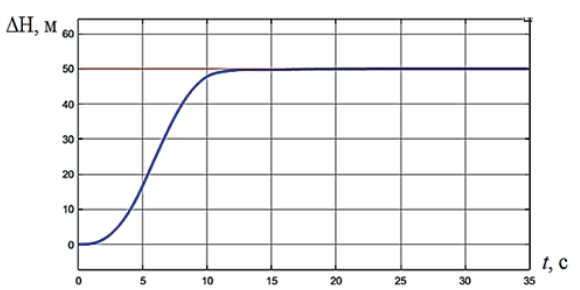
$$K_H = K_\upsilon\left(0{,}2\frac{1}{T_\theta n V_a}\right),\ K_\upsilon = \frac{K_\alpha}{T_\theta},$$

где n — коэффициент (n = 1,1÷1,5); K_α = (5÷9) — коэффициент передачи канала, который определяется отношением площади руля высоты к площади крыла с учетом их плеч относительно ЦМ.

$$K_{\omega x} = 1.$$

В качестве САУ БЛА был использован ПИД — регулятор [17]. Уравнение ПИД — регулятора, описывается выражением:

$$\delta_{рв} = K_{\omega_x}\omega_x + K_\vartheta \vartheta + \left(\frac{K_н^{\int}}{p} + K_н + \frac{K_н T_и}{1+\frac{T_и}{p}}\right)\Delta H,$$



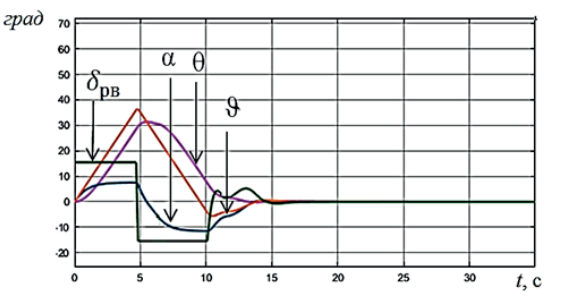


Рис. 9. Результаты моделирования ($H_{тек}$ = 300 м; $H_{зад}$ = 350 м; V_a = 15 м/с)

где $T_и = 30$ [с] — постоянная времени изодрома; $K_н = 0{,}15$ — передаточный коэффициент по дифференциалу рассогласования высоты; $K_н^{\int} = 0{,}000025$ — передаточный коэффициент по интегралу рассогласования высоты.

Проведенные исследования показали [4], что основными нелинейностями, влияющими на выходной сигнал контура управления высотой полета БЛА, являются: ограничение в максимальном угле отклонения руля высоты (± 15 град) и ограничение в максимальной регистрируемой угловой скорости датчиком типа ВОГ (± 500 град/с). Это учитывалась при моделировании. Результаты моделирования представлены на *рис. 9*.

Алгоритм функционирования БИНС

Матрица направляющих косинусов C^{gb} между системами координат $OX_gY_gZ_g$ и $O\xi\eta\zeta$, через параметры Родрига-Гамильтона, имеет вид [9]:

$$C^{gb}(1,1) = 2\lambda_0^2 + 2\lambda_1^2 - 1; \quad C^{gb}(1,2) = 2(-\lambda_0\lambda_3 + \lambda_1\lambda_2); \quad C^{gb}(1,3) = 2(\lambda_1\lambda_3 + \lambda_0\lambda_2);$$
$$C^{gb}(2,1) = 2(\lambda_0\lambda_3 + \lambda_1\lambda_2); \quad C^{gb}(2,2) = 2\lambda_0^2 + 2\lambda_2^2 - 1; \quad C^{gb}(2,3) = 2(-\lambda_0\lambda_1 + \lambda_2\lambda_3);$$
$$C^{gb}(3,1) = 2(\lambda_1\lambda_3 - \lambda_0\lambda_2); \quad C^{gb}(3,2) = 2(\lambda_0\lambda_1 + \lambda_2\lambda_3); \quad C^{gb}(3,3) = 2\lambda_0^2 + 2\lambda_3^2 - 1.$$

Начальные значения параметров Родрига-Гамильтона:

$$\lambda_0 = cos(\psi/2)cos(\vartheta/2)cos(\gamma/2) + sin(\psi/2)sin(\vartheta/2)sin(\gamma/2);$$
$$\lambda_1 = cos(\psi/2)sin(\vartheta/2)cos(\gamma/2) + sin(\psi/2)cos(\vartheta/2)sin(\gamma/2);$$
$$\lambda_2 = cos(\psi/2)cos(\vartheta/2)sin(\gamma/2) - sin(\psi/2)sin(\vartheta/2)cos(\gamma/2);$$
$$\lambda_3 = cos(\psi/2)cos(\vartheta/2)sin(\gamma/2) - sin(\psi/2)sin(\vartheta/2)cos(\gamma/2).$$

Алгоритм вычисления координат и параметров углового положения БЛА в географическом сопровождающем базисе, использующий в качестве промежуточных параметров ориентации параметры Родрига-Гамильтона, подробно описан в [9]. Для вычисления значения углов псевдоповоротов, использовался алгоритм второго порядка точности, реализующий метод средней скорости [18]:

$$\Upsilon_0 = \left(\Upsilon_1^2 + \Upsilon_2^2 + \Upsilon_3^2\right)^{0.5}, \quad \lambda_0 = cos\frac{\Upsilon_0}{2}, \quad \lambda_j = \Upsilon_0^{-1}\Upsilon_i sin\frac{\Upsilon_0}{2}, \quad (i = 1,...,3; j = 1,...,3),$$

где $\Upsilon_i = \int_{t_{n-1}}^{t_n} \omega_i(t)\,dt_n$, t_{n-1} – предыдущий момент времени вычисления.

Контроль точности вычислений уравнения, описывающего изменение параметров Родрига-Гамильтона в зависимости от проекций абсолютной угловой скорости ω_{xc}, ω_{yc}, ω_{zc} и проекций переносной угловой скорости ω_ξ, ω_η, ω_ζ, проводился по отклонению нормы кватерниона [9]:

$$N_0 = 1 - \left(\Upsilon_0^2 + \Upsilon_1^2 + \Upsilon_2^2 + \Upsilon_3^2\right).$$

Если $N_0 > N_Д$, т.е. вычисленная норма отличается от 1 в допуске $N_Д$ (10^{-7}), параметры кватерниона уточняют по формулам:

$$\lambda_0 = \lambda_0 + 0{,}5N_0\lambda_0;$$
$$\lambda_1 = \lambda_1 + 0{,}5N_0\lambda_1;$$
$$\lambda_2 = \lambda_2 + 0{,}5N_0\lambda_2;$$
$$\lambda_3 = \lambda_3 + 0{,}5N_0\lambda_3.$$

Вычисленные значения углов ориентации:

$$\vartheta = arsin(2\lambda_0\lambda_1 + 2\lambda_2\lambda_3);$$

$$\gamma = -arctg\left(\frac{2\lambda_1\lambda_3 - 2\lambda_0\lambda_2}{\lambda_0^2 - \lambda_1^2 - \lambda_2^2 + \lambda_3^2}\right);$$

$$\psi = arctg\left(\frac{-2\lambda_0\lambda_3 + 2\lambda_1\lambda_2}{\lambda_0^2 - \lambda_1^2 + \lambda_2^2 - \lambda_3^2}\right).$$

Результаты расчета углов пространственной ориентации и координат БЛА от времени полета, представлены на *рис. 10* и *11*.

Как видно из *рис.10, а*, ветровые возмущения, приводят к существенному изменению значений СКО установившегося угла тангажа: $\delta_\vartheta = 0{,}001$ град, при $V_б = 0$ м/с и $\delta_\vartheta = 0{,}06$ град, при $V_б = 5$ м/с и $V_а = 20$ м/с. СКО значений угловой скорости, изменяется незначительно и имеет порядок 10^{-3}, при $V_б = 0$ м/с — $\delta_{\omega x} = 0{,}0009$ град/с, а при $V_б = 5$ м/с — $\delta_{\omega x} = 0{,}001$ град/с, *рис. 10, б*. СКО ошибки по широте δ_φ (*рис. 11*) увеличивается по мере роста скорости ветра и уменьшении скорости полета БЛА. СКО ошибки по долготе δ_λ, практически не изменяется (± 1 %).

Для численной оценки влияния воздействия ветра на ошибки вычисления координат БИНС (широты места) при типовом диапазоне высот и скоростей полета БЛА, был проведен факторный

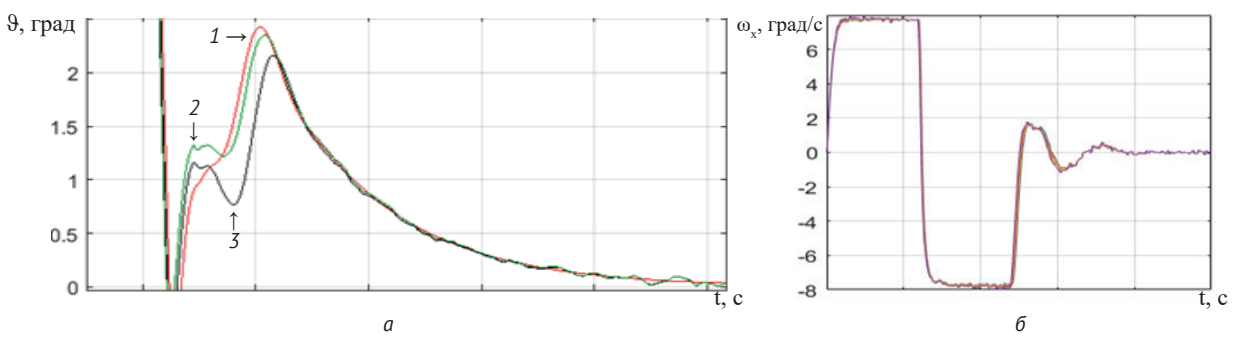


Рис. 10. Результаты расчета углов пространственной ориентации: СКО установившегося угла тангажа (а) и угловой скорости (б) ($H_{тек}$ = 300 м; $V_а$ = 20 м/с), при $V_б$: *1* – 0 м/с; *2* – 3 м/с; *3* – 5 м/с

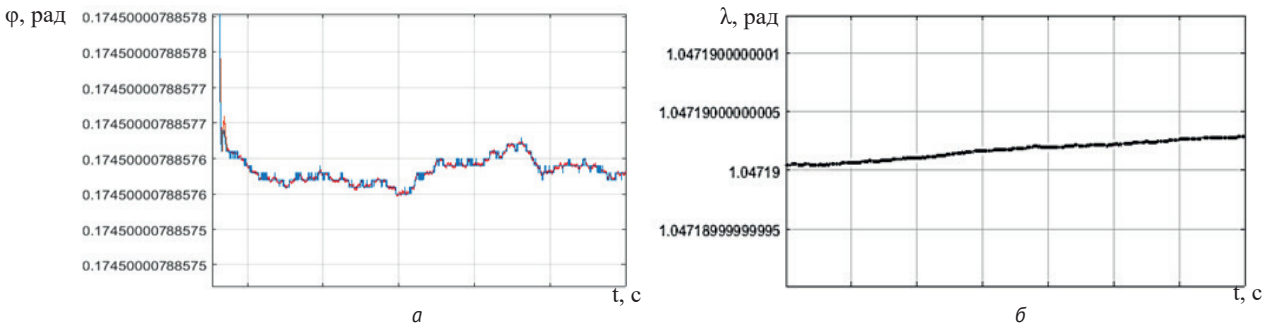


Рис. 11. Результаты расчета координат БЛА
($H_{тек}$ = 300 м; V_a = 20 м/с), при $V_б$: *а* – 0 м/с; *б* – 5 м/с

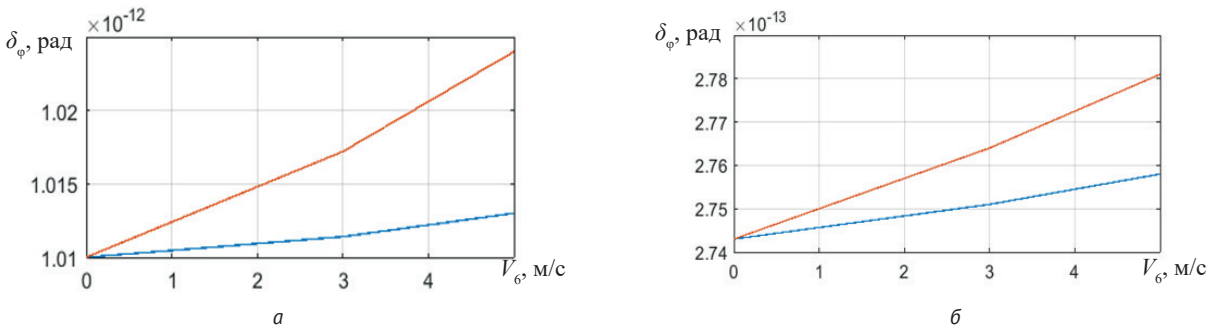


Рис. 12. Зависимости δ_φ от $V_б$, при V_a = 5 м/с (а); V_a = 15 м/с (б)

эксперимент, при фиксированном времени полета 1 час. Составляющие СКО координат БЛА, зависящие от погрешностей датчиков (за 1 час полета) на 2 порядка ниже составляющих СКО координат, обусловленных ветровыми возмущениями.

Факторы рассматриваются как детерминированные величины, отклик как случайная величина. Максимальный уровень фактора равен +1, минимальный — -1 и средний — 0 (*таблица 4*). Турбулентность атмосферы — умеренная.

Для количественной проверки гипотезы об адекватности выбранной модели, использовался коэффициент детерминации — R^2 [19]. Результат регрессионного анализа (при R^2=0,993), представлен в виде математической зависимости 2-го порядка:

$$\delta_\varphi = a_0 + a_1 V_a + a_2 H + a_3 V_б + a_4 V_a^2 + a_5 H^2 + a_6 V_б^2 \ ,$$

где a_0=1,1407e-12; a_1=0; a_2=0;
a_3=−1,8814e-14; a_4=−3,8738e-15;
a_5=−2,8596e-19; a_6=5,533e-15.

Таблица 4. Условия факторного эксперимента

-1	0	+1	Фактор
5	10	15	$V_п$, [м/с]
0	3	6	$V_б$, [м/с]
50	200	300	H, [м]

Заключение

Таким образом, для достижения поставленной цели разработаны математические модели ветра с учетом его порывистой части и ветра устойчивого направления, действующего на БЛА в связанной системе координат, нелинейная математическая модель контура управления высотой полета БЛА с учетом влияния основных нелинейностей элементов сервопривода автопилота на его выходной сигнал, а также математические модели навигационных датчиков БИНС с учетом их погрешностей и шумов измерений. Получена формула аппроксимации среднеквадратического отклонения широты места БЛА (самолетного типа, малой массы ≤ 25 кг) вычисленной типовой БИНС от условий полета с учетом ветровых возмущений.

Полученную математическую зависимость (2) можно использовать в целях разработки математического обеспечения робастных БИНС БЛА или управляемых средств поражения малой массы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Капля, В. И. Калибровка трехосного акселерометра по данным ряда измерений различной ориентацией / В. И.Капля, И. В.Савицкий, Д. А. Мастиков // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 2. – [Электронный ре-сурс]. – Режим доступа: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4963. – Дата доступа: 21.02.2022.
2. Кивокурцев, А. Л. Особенности алгоритмического обеспечения авиационной бесплатформенной инерциальной навигационной системы и возможность синтеза высокоточного безразгонного экономичного алгоритма блока ориентации / А. Л.Кивокурцев, С. В. Мишин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2013. – № 3 (39). – С. 120-126.
3. Санько, А. А. Математическое моделирование ветровых возмущений, действующих на вертикальный канал беспилотного летательного аппарата / А. А. Санько, А. А. Шейников // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. – 2019. – № 4 (23). – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http:// ce.if-mstuca.ru.
4. Малкин, В. А. Влияние ветровых возмущений и нелинейностей сервопривода на контур стабилизации высоты полета беспилотного летательного аппарата / В. А Малкин, И. В. Рожков, А. А. Санько // Системный анализ и прикладная информатика. – 2019. – № 2. – С. 23-30.
5. Биард Рэндал, У. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика / У. Рэндал Биард, У. МакЛэйн Тимоти.– Москва: ТЕХНО-СФЕРА, 2015. – 312 с.
6. Analyze and visualize aerospace vehicle motion using reference standards and models [Electronic resource]. – Access mode: https: // www. math-works.com/ help/aerotbx/environment.html. – Access date: 03.05.2019.
7. Скорость ветра [Electronic resource]. – Access mode: https: // www. energywind.ru/recomendacii/skorost-vetra-belarus. html. – Access Date: 02/20/2019.
8. Титовский, И. Н. Характеристики ветровых возмущений в нижних слоях атмосферы / И. Н. Титовский, З. С. Огородникова // Обзор ОНТИ ЦАГИ. – 1979. – № 545. – С. 53-61.
9. Мелешко, В. В. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы. Учебное пособие / В. В. Мелешко, О. И. Нестеренко. – Кировоград: ПОЛИМЕД-Сервис, 2011. – 171 с.
10. Production company «Optolink» [Electronic resource]. – Access mode: https: // www.optolink.ru/ru/products.html. – Access date: 21.02.2022.
11. Матвеев, В. В. Инженерный анализ погрешностей БИНС / В. В. Матвеев. – Известия ТулГУ. Технические науки, 2014. – Вып. 9. – Ч. 2. – С. 251-256.
12. Депутатова, Е. А. Анализ шумовых составляющих кварцевого маятникового акселерометра с цифровым усилителем обратной связи / Е. А. Депутатова, Д. С. Гнусарева, Д. М. Калихмана // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2018. – Т.18, № 6. – С. 1091-1098.
13. Бегемгем, М. Шумы в электронных приборах и системах / М. Бегемгем. – М.: Мир, 1986. – 399 с.
14. Павлов, Д. В. Математическая модель волоконно-оптического гироскопа для статической системы / Д. В. Павлов. – Прикладная фотоника. –2014. – № 2. – С. 99-106.
15. Распопов В. Я. Автопилот минибеспилотного летательного аппарата / В. Я. Распопов [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 10. –С.19-22.
16. Гриднев, Ю. В. Робастный автопилот канала тангажа беспилотного летательного аппарата / Ю. В. Гриднев, А. Г. Иванов // Доклады БГУИР. – 2017. – № 3 (150). – С. 40-44.
17. Михалев, И. А. Системы автоматического управления полетом самолета. Методы анализа и расчета / И. А. Михалев– Москва: Машиностроение, 1971. – 464 с.
18. Челноков, Ю. Н. Исследование алгоритмов определения инерциальной ориентации движущегося объекта / Ю. Н.Челноков, С. Е. Переляев, Л. А. Челнокова // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика. – 2016. – Т. 16, вып. 1. – С. 80-95.
19. Бараз, В. Р. Корреляционно-регрессионный анализ связи показателей коммерческой деятельности с использованием программы Excel: учеб. пособие / В. Р. Бараз. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ–УПИ», 2005. – 102 с.

REFERENCES

1. Kaplya, V. I. Calibration of a triaxial accelerometer according to a number of measurements with different orientations / V. I. Kaplya, I. V.Savitsky, D. A. Mastikov // Engineering Bulletin of the Don. – 2018. – No. 2. – [Electronic resource]. – Access mode: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2018/4963. – Access date: 21.02.2022.
2. Kivokurtsev, A. L. Features of algorithmic support of the aeronautical free-form inertial navigation system and the possibility of synthesis of a high-precision, cost-effective algorithm of the orientation block / A. L. Kivokurtsev, S. V. Mishin // Modern technologies. System analysis. Modeling. – 2013. – № 3 (39). – P. 120-126.
3. Sanko, A. A. Mathematical modeling of wind disturbances acting on the vertical channel of an unmanned aerial vehicle / A. A. Sanko, A. A. Sheynikov // Crede Experto: transport, society, education, language. – 2019. – № 4 (23). – [Electronic resource]. – Access mode: http:// ce.if-mstuca.ru .
4. Malkin, V. A. The influence of wind disturbances and servo nonlinearities on the contour of flight altitude stabilization of an unmanned aerial vehicle / V. A. Malkin, I. V. Rozhkov, A. A. Sanko // System analysis and applied computer science. – 2019. – No. 2. – P. 23-30.
5. Biard Randal, W. Small unmanned aerial vehicles: theory and practice / W. Randal Biard, W. McLane Timothy. – Moscow: TECHNOSPHERE, 2015. – 312 p.
6. Analyze and visualize aerospace vehicle motion using reference stand-ards and models [Electronic resource]. – Access mode: https: // www. math-works.com/ help/aerotbx/environment.html. – Access date: 03.05.2019.
7. Wind speed [Electronic resource]. – Access mode: https://www. ener-gywind.ru/recomendacii/skorost-vetra-belarus. html. – Access Date: 02/20/2019.
8. Titovsky, I. N. Characteristics of wind disturbances in the lower layers of the atmosphere / I. N. Titovsky, Z. S. Ogorodnikova // Review of ONTI TsAGI. – 1979. – No. 545. – pp. 53-61.
9. Meleshko, V. V. Strapform inertial navigation systems. Textbook / V. V. Meleshko, O. I. Nesterenko. – Kirovograd: POLYMED-Service, 2011. – 171 p.
10. Production company «Optolink» [Electronic resource]. – Access mode: https: // www.optolink.ru/ru/products.html. – Access date: 21.02.2022.
11. Matveev, V. V. Engineering error analysis of BINS / V. V. Matveev // Izvestia TulGU. Technical Sciences. – 2014. – Vol. 9. Part 2. – P.251-256.
12. Deputatova, E. A. Analysis of noise components of a quartz pendulum accelerometer with a digital feedback amplifier / E. A. Deputatova, D. S. Gnusareva, D. M. Kalikhman // Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics.- 2018. – Vol. 18, No. 6. – P. 1091-1098.
13. Begemgem, M. Noise in electronic devices and systems / M. Begemgem. – M.: Mir, 1986. – 399 p.
14. Pavlov, D. V. Mathematical model of a fiber-optic gyroscope for a stat-ic system / D. V. Pavlov. – Applied photonics. -2014. – No. 2. – P. 99-106.
15. Raspopov V. Ya. Autopilot of a mini-unmanned aerial vehicle / V. Ya. Raspopov [et al.] // Mechatronics, automation, control. – 2008. – No.10. – P.19-22.
16. Gridnev, Yu. V. Robust autopilot of the pitch channel of an unmanned aerial vehicle / Yu. V. Gridnev, A. G. Ivanov // Reports of the BSUIR. – 2017. – № 3 (150). – P. 40-44.
17. Mikhalev, I. A. Automatic flight control systems of the aircraft. Methods of analysis and calculation / I. A. Mikhalev– Moscow: Mashinostroenie, 1971. – 464 p.
18. Chelnokov, Yu. N. Investigation of algorithms for determining the inertial orientation of a moving object / Yu. N.Chelnokov, S. E.Perelyaev, L. A. Chelnokova // Izv. Sarat. un-ta. Nov. ser. Ser. Mathematics. Mechanics. Computer science. - 2016. – Vol. 16, issue 1. – P. 80-95.
19. Baraz, V. R. Correlation and regression analysis of the relationship of indicators of commercial activity using the Excel program: textbook. manual / V. R. Baraz. – Yekaterinburg: GOU VPO "UGTU–UPI", 2005. – 102 p.

Статья поступила в редакцию
16.05.2022

УДК 621.822.841.1

Е.А. ШАПОРОВА, С.О. СТОЙКО

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РОЛИКОВОГО ПОДШИПНИКА АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Елена Анатольевна Шапорова *– кандидат химических наук, заведующий аспирантурой учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь*
shaporova.e@bgaa.by

Elena Shaporova *– Candidate of Chemical Sciences, Head of Postgraduate Studies of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus*
shaporova.e@bgaa.by

Сергей Олегович Стойко *– магистр технических наук, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь*
sergey_14_95@mail.ru

Sergey Stoiko *– Master of Technical Sciences, Researcher of the Research Laboratory of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus*
sergey_14_95@mail.ru

Аннотация: *статья посвящена моделированию напряженно-деформированного состояния элементов роликового подшипника силовой опоры газотурбинного двигателя при действии статической нагрузки. В ходе исследований разработана конечно-элементная модель роликового подшипника, обоснованы оптимальные размеры ячеек конечно-элементной сетки и сгущения в зонах контакта роликов с валом и внешней обоймой. Расчеты напряженно-деформированного состояния (НДС) при действии статической нагрузки свидетельствуют о допустимых значениях местных перенапряжений в местах контакта, присутствии краевого эффекта и неравномерности НДС контактирующих тел. Показана необходимость учета радиальных нагрузок.*
Ключевые слова: *авиационная техника, роликовый подшипник, тела качения, узел трения, задача Герца, конечно-элементная модель, напряженно-деформированное состояние, контактные площадки.*

Abstract: *the article is devoted to modeling the stress-strain state of the elements of the roller bearing of the power support of a gas turbine engine under the action of static load. In the course of research, a finite element model of a roller bearing has been developed, optimal cell sizes of the finite element mesh and thickening in the contact zones of the rollers with the shaft and the outer cage have been substantiated. Calculations of the stress-strain state (SSS) under the action of a static load indicate the permissible values of local overvoltages at the contact points, the presence of the edge effect and the uneven SSS of the contacting bodies. The necessity of taking into account radial loads is shown.*
Keywords: *aviation technology, roller bearing, rolling elements, friction unit, Hertz problem, finite element model, stress-strain state, contact pads.*

Обеспечение безопасности полетов, надежности и энергоэффективности авиационной техники является важнейшим требованием, предъявляемым к эксплуатации воздушных судов. Безопасность полетов в значительной степени определяется надежностью летательных аппаратов и безотказной работой авиационных двигателей, что, в свою очередь, зависит от их технического состояния. В процессе эксплуатации, под воздействием различных факторов, в том числе экстремальных нагрузок, высокотемпературных режимов, агрессивных сред и других сложных условий работы, исходное техническое состояние ухудшается, возрастает вероятность возникновения отказов.

Статистика авиационных происшествий свидетельствует о том, что их причиной чаще всего становятся нарушения работы двигателей, в частности появление

посторонних частиц в системе смазки узлов трения [1], что может быть следствием повреждения трущихся поверхностей. В ходе эксплуатации газотурбинных двигателей (ГТД) семейства Д-30КУ/КП/КУ-154-2 серии, чаще всего причинами нарушения работы являются износ элементов узла трения, появление посторонних частиц в системе смазки узлов трения, что приводит к возникновению дефектов шарикового и/или роликового подшипника (РП) основных опор [2, 3]. Случаи разрушения РП зафиксированы и при эксплуатации зарубежной техники семейства А320 с двигателями CFM-56A [4, 5]. На сегодня в гражданской авиации Республики Беларусь эксплуатируются самолеты с силовыми установками Д-30КП-2, которые стоят на «особом контроле» из-за срабатывания датчика сигнализации о наличии «стружки в масле», что свидетельствует о повышенном износе и возможном образовании дефектов РП опоры.

Очевидно, что мониторингу технического состояния авиационных компонентов, в частности подшипников, применяемых в опорах двигателей, целесообразно уделять особое внимание, как при проектировании, так и в ходе эксплуатации. На сегодня перспективным направлением оценки технического состояния авиационного двигателя нам представляется трибодиагностика, основанная на комплексном подходе [6 – 7].

Наиболее эффективное комплексное решение подобных инженерных задач возможно с помощью компьютерного моделирования, в частности, с использованием метода конечных элементов, зарекомендовавшим себя достаточно эффективным и экономичным инструментом [8 – 10].

Виртуальное моделирование в ANSYS (№ 2017-б/140) пиковых режимов нагружения исследуемого подшипника позволяет еще на стадии разработки оценить соответствие свойств заданным требованиям и в случае несоответствия выполнить доработку и последующую расчетную оценку эффективности изменений. Такой подход позволяет избежать необходимости изготовления в металле прототипов конструкций, проведения многочисленных промежуточных натурных испытаний. Это, в свою очередь, дает значительную экономию времени и материальных затрат. Представляется эффективным и изучение напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов работающих РП с целью прогнозирования их технического состояния и возможностей дальнейшей эксплуатации.

Настоящая работа посвящена моделированию НДС элементов РП при действии статической нагрузки.

Рис.1. Элементы демонтированного РП

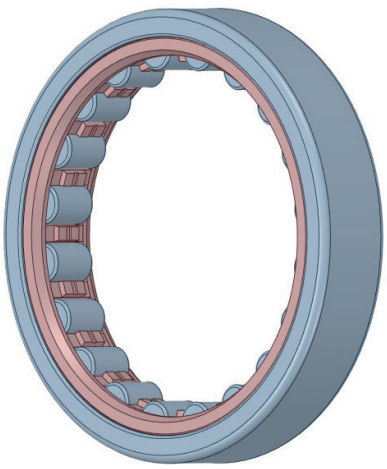


Рис.2. Объемная трехмерная модель РП

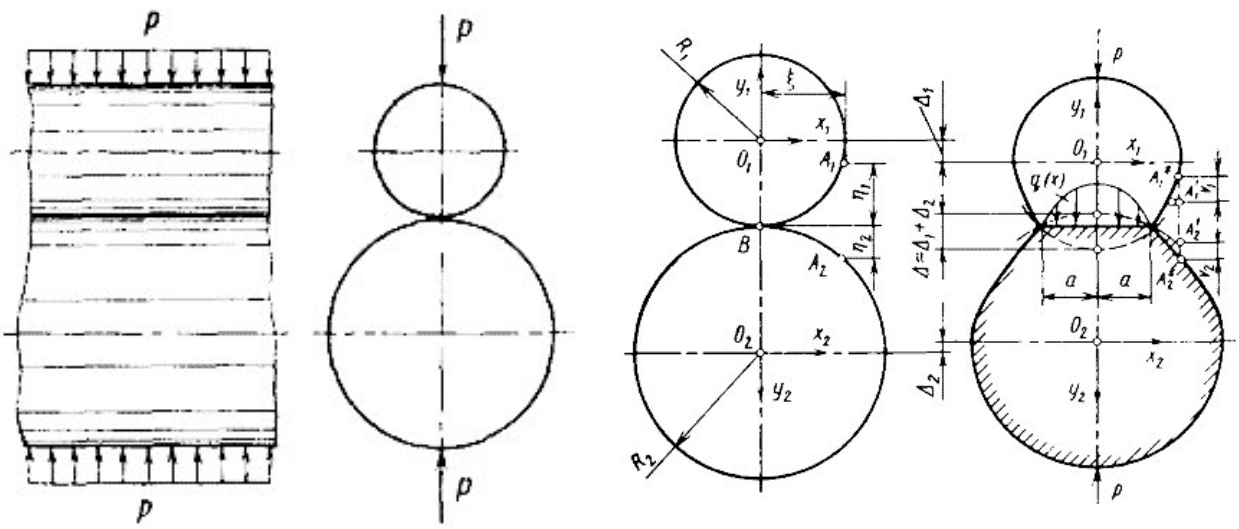


Рис.3. Контактная задача для цилиндров [12]

Таблица 1. Результаты спектрального анализа материала элементов РП

Образец	Содержание элемента, масс. %								
	C	P	S	V	Cr	Mn	Cu	W	Fe
Ролик	0,75	0,023	0,024	1,463	4,3	0,304	0,147	8,542	Основа
Наружное кольцо	0,75	0,023	0,024	1,463	4,3	0,304	0,147	8,542	Основа

Таблица 2. Характеристика вольфрамовой стали 8Х4В9Ф2-Ш [11]

Марка материала	Модуль упругости, E, ГПа	Предел упругости, $\sigma_{0.05}$, МПа	Предел текучести, $\sigma_{0.2}$, МПа	Предел прочности, $\sigma_{в}$, МПА	Коэффициент Пуассона, μ	Максимальная рабочая температура, T_{max}, °С	Плотность, ρ, т/м^3
Сталь 8Х4В9Ф2-Ш	210	2060	2365	2670	0,3	500	7,8

Методика исследования

На начальном этапе для проведения экспериментальных и теоретических исследований с силовой опоры двигателя Д-30КП-2, снятого с эксплуатации, был демонтирован РП (*рис. 1*), при визуальном осмотре которого обнаружены следующие дефекты:

- *выкрашивание на дорожке качения наружной обоймы;*
- *выкрашивание тел качения;*
- *скол борта наружной обойм с отрывом нескольких фрагментов.*

Они подтверждают необходимость мониторинга работы узлов трения для ранней диагностики их технического состояния.

Спектральный анализ элементов РП с помощью оптического эмиссионного спектрометра S5 GNRS5 Solaris CCD Plus позволил установить материал тел качения и наружного кольца РП. Полученные данные (*таблица 1*) соответствуют составу вольфрамовой стали 8Х4В9Ф2-Ш, представляющей собой конструкционную подшипниковую сталь, работающую в агрессивных средах при воздействии высоких температур (*таблица 2*).

Для такой стали характерна твердость 60–65 единиц по HRC, что подтвердили измерения твердости тел качения и наружной обоймы РП, которые были проведены на автоматическом универсальном твердомере AFFRI-URBV-VRS, твердость материала показала 62,9 единицы по HRC, что соответствует условиям работы подшипника в силовой опоре ГТД.

Анализируемый подшипник не является стандартным готовым изделием, в связи с чем были сняты его геометрические размеры и в среде КОМПАС-3D (№ Бл-17-00044) была построена компьютерная трехмерная модель РП (*рис. 2*).

Определение оптимального сгущения сетки конечных элементов в зонах контактов проводилось на основе валидации модели при решении задачи Герца. На *рис. 3* изображена типичная контактная задача для элементов простой формы, при решении которой будет проведен анализ напряжений и деформаций в зоне контакта. В большинстве контактных задач, даже при работе материала в упругой зоне, зависимость между внешней силой и вызванным ею перемещением оказывается нелинейной, что объясняется изменением площадки контакта по мере возрастания силы.

Уравнения, описывающие зависимость максимального нормального давления q_{max} и полуширины плоскости контакта a от действующей внешней нагрузки [12], имеют вид:

$$q_{\max} = 0,42\sqrt{pE\frac{R_1+R_2}{R_1R_2}}, \quad a = 1,52\sqrt{\frac{p}{E}\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}}, \tag{1}$$

где q_{max} — максимальное нормальное давление, МПа;

R_1 и R_2 — радиусы первого и второго цилиндров, $R_1 = 7,45$ мм и $R_2 = 62,75$ мм;

E — модуль упругости материала, $E = 210000$ МПа;

p — воздействующая нагрузка на цилиндры, $p = 1000/17.8 = 56.2$ Н;

a — полуширина плоскости контакта, мм.

Решение этих уравнений позволило получить величину максимального нормального давления в зоне контакта и полуширину плоскости контакта, значения которых затем использовались для валидации конечно-элементной сетки в ANSYS и последующей настройки программного комплекса для получения корректных данных:

$$q_{\max} = 0,42\sqrt{56,2\cdot 210000\frac{7,45+62,75}{7,45\cdot 62,75}} = 559,12 \text{ МПа}; \tag{2}$$

$$a = 1,52\sqrt{\frac{56,2}{210000}\frac{7,45\cdot 62,75}{7,45+62,75}} = 0,06416 \text{ мм}. \tag{3}$$

Решение задачи Герца методом конечных элементов (МКЭ) в про-

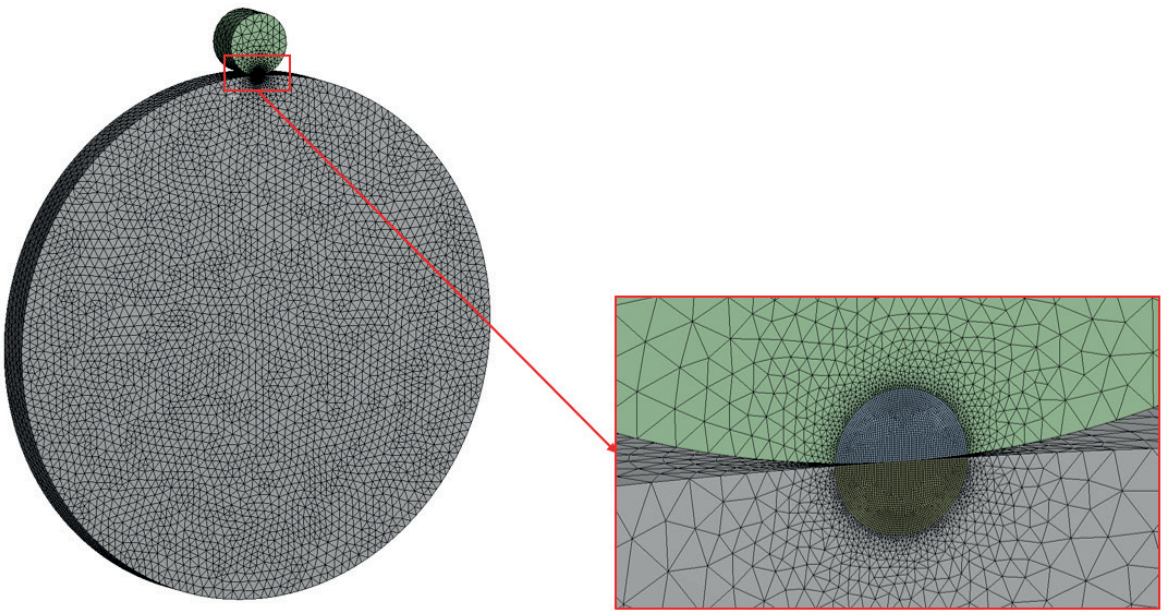


Рис.4. КЭ модель, подготовленная для валидации густоты сетки

граммном комплексе ANSYS Workbench осуществлялось на модели роликов, соответствующих по размерам телам качения реального РП. Расчетная нагрузка прикладывалась к внешним поверхностям роликов.

Методом подбора устанавливался коэффициент сгущения сетки конечных элементов (КЭ) таким образом, чтобы величина максимального нормального давления в зоне контакта и полуширина плоскости контакта в виртуальной модели соответствовала аналитическим данным, в результате чего получена КЭ модель (*рис. 4*) с оптимальной густотой сетки. Среднее значение элементов составляет 0,015 мм. Расчетная модель состоит из 26 110 конечных элементов.

При расчете модели принимались допущения в виде расчета 1/4 модели цилиндров и расчете области в радиусе 0,3 мм около контакта.

Точность решения задачи Герца средствами конечно-элементного анализа X оценивается величиной погрешности относительно действительного значения, полученного аналитическим методом $X_Д$ по формуле:

$$\Delta X = X - X_Д, \qquad (4)$$

где ΔX — абсолютная погрешность;

X — величина оцениваемого значения;

$X_Д$ — величина действительного значения.

Таким образом, относительная погрешность решения задачи Герца выражается:

$$\delta = \frac{\Delta X}{X_Д} \cdot 100\%, \qquad (5)$$

где δ — относительная погрешность.

Погрешность результатов, полученных при решении задач Герца МКЭ (*таблица 3*), не превышает 1,5 %, следовательно, подобранное сгущение сетки КЭ в зоне контакта достаточно для проведения дальнейших исследования НДС РП.

Изучение НДС элементов РП проводилось при максимальных нагрузках рабочих режимов ГТД [13]: внутренняя обойма — вал вращается со скоростью:

- *10810 об/мин. — взлетный режим;*
- *10230 об/мин. — номинальный режим;*
- *8980 об/мин. — посадочный малый газ;*
- *8640 об/мин. — малый газ на земле.*

Таблица 3. Сравнение результатов решения задачи Герца

Показатели	Решение задачи Герца аналитически	Решение задачи Герца методом КЭА	Погрешность, %
Максимальное нормальное давление в зоне контакта, МПа	559,12	567,51	1,5
Полуширина плоскости контакта, мм	0,06416	0,06429	0,2

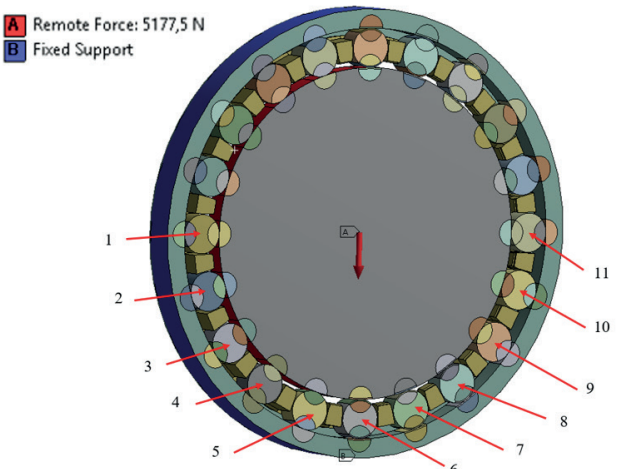


Рис.5. Задание граничных условий для статического расчета

Обсуждение результатов

Для определения распределения нагрузки на ролики подшипника проводился статический расчет, в котором для внешнего кольца подшипника задавались ограничения перемещений и вращений по 6-и степеням свободы, а к валу прикладывалась половинная вертикальная нагрузка в 5177,5 Н. Нумерация роликов показана на *рис. 5*. Вся нагрузка распределяется на ролики нижней половины подшипника, ролики, находящиеся в верхней части, нагрузку не испытывают.

Для проведения расчета подшипника необходимо сильное сгущение сетки конечных элементов, что в свою очередь требует больших машинных мощностей и расчетного времени, поэтому дальнейшее моделирование проводилось на секторе, соответствующего 1/20 части подшипника и разделенного на 1/2 части вдоль оси симметрии (*рис. 6*).

Результаты расчета НДС РП в виде зависимостей максимального нормального напряжения в месте контакта и полуширины контактной площадки, а также изображение НДС сектора подшипника при действии статической нагрузки в 10355 Н представлены на *рис. 7* и *8* соответственно.

Шкала давлений отрегулирована так, что красным цветом показаны максимальные по абсолютной величине, синим цветом — минимальные значения рассматриваемых физических величин.

Полученные результаты свидетельствуют о сравнительно невысоких контактных напряжениях, указывающих на возникновение упругих деформаций, обусловленных сжатием неровностей на контактирующих поверхностях рабочих тел РП. В то же время при действующей умеренной нагрузке (10,3 кН) возможно возникновение незначительных пластических деформаций поверхностных выступов накатывающихся или проскальзывающих поверхностей сопряженных тел. Дальнейшее повышение нагрузок, в том числе и радиальных, может приводить к сдвигу с отрывом металла и его дальнейшим измельчением, обусловленным условиями работы рассматриваемого узла трения.

Напряженно-деформированное состояние сектора подшипника (*рис. 8*) указывает на неравномерное развитие местных перенапряжений слоев металла, находящихся вблизи контактной площадки и развивающихся вглубь, возникает всплеск напряжений в зоне конца контактной площадки, так называемый «краевой эффект», что может привести с учетом радиальных нагрузок, к деформации, превышающей

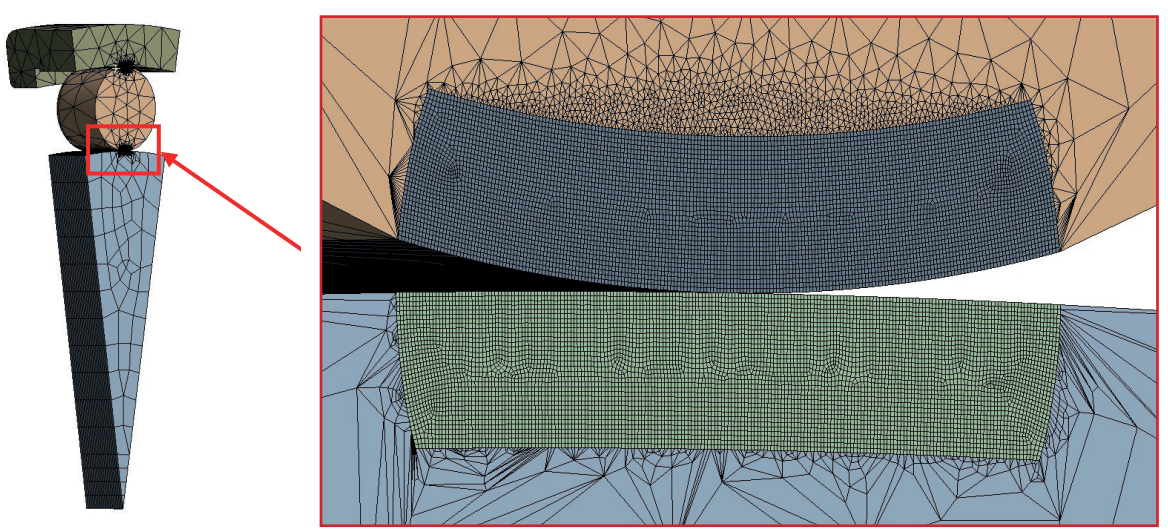


Рис.6. КЭ модель сектора подшипника

допустимую, и дефектам поверхностей контакта. Очевидно, что влияние свойств смазывающего материала будет значительным для обеспечения снижения трения и вывода продуктов износа из зоны контакта. Кроме того, вид образующихся продуктов износа (форма, количество) будет определять вид деформации, а, следовательно, и степень разрушения поверхностей. Рассчитанные значения контактных напряжений значительно меньше допустимых значений, которые для РП составляют 4 000 МПа. Очевидно, что для определения реальной картины нагрузок, испытываемых РП в процессе эксплуатации, необходим учет радиальных нагрузок, вызываемых вращением элементов узла трения в силовой опоре, что будет рассмотрено на следующем этапе.

Заключение

В ходе исследований разработана конечно-элементная модель роликового подшипника, проведена валидация размеров конечно-элементной сетки на основании аналитических расчетов и подобрано оптимальное сгущение в зонах контакта роликов с валом и внешней обоймой, выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния при действии статической нагрузки.

Анализ полученных данных свидетельствует о допустимых значениях местных перенапряжений в местах контакта; неравномерном распределении их вглубь контактирующих тел, присутствии краевого эффекта, что может привести к дефектам и разрушениям поверхностей при учете радиальных нагрузок.

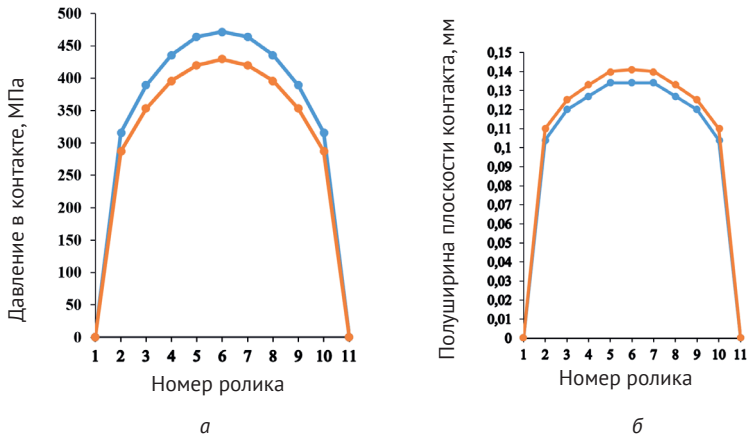


Рис.7. Значения максимальных нормальных давлений в зонах контакта (а) и полуширины плоскости контакта (б), полученные в ходе КЭ моделирования.
Вал-ролик; Обойма-ролик

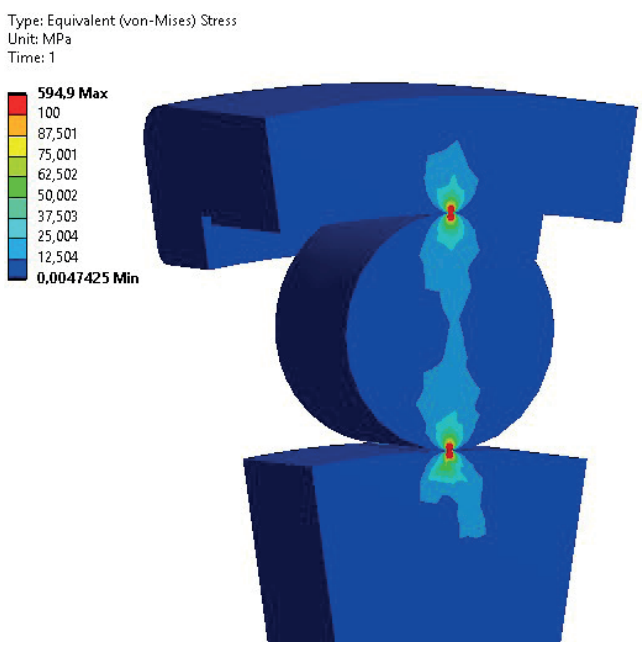


Рис.8. Напряженно-деформированное состояние сектора подшипника

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Анализ влияния надежности на безопасность полетов по типу ВС. – М.: Госцентр безопасности полетов. – 2009. – 48 с.
2. Гречишников, О. В. Обеспечение роботоспособности роликового подшипника / О. В. Гречишников, А. Ю. Балакин, А. Д. Росляков // Вестн. Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2013. – № 3(41). С. – 48-56.
3. Беломытцев, О. М. О совершенствовании методики расчета авиационных подшипников качения ГТД / О. М. Беломытцев // Вестн. ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. – 2021. – № 67. – С. 35-42.
4. Петрова, Т. В. Анализ разрушения радиального вала отбора мощности двигателей семейства CFM56 / Т. В. Петрова // Вестн. Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. – 2019. – С. 130-137.
5. Ануров, Ю.М. Обеспечение показателей ресурса и надежности ГТД стационарного применения / Ю. М. Ануров [и др.] // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 51. – С. 4-8.
6. Жукова, А. А. Мониторинг авиационного двигателя на наличие металлических примесей в масле / А. А. Жукова, Е. А. Шапорова, С. О. Стойко // Вестн. БелГУТа: наука и транспорт. – 2021. – № 1 (42). – С. 48-51.

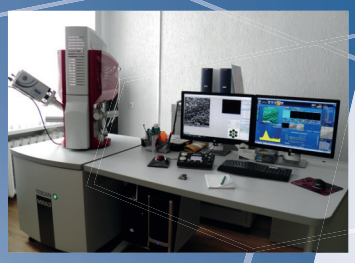
7. Шапорова, Е. А. Обоснование комплексной оценки технического состояния ГТД на основе трибодиагностики / Е. А. Шапорова, А. Г. Капустин, С. О. Стойко // Авиационный вестн. – 2021. – № 4. – С. 55-62.
8. Лисицин, А. И. Повышение эффективности проектирования маслянных полостей опор ГТД на основе метода численного моделирования двухфазного течения: автореф. дис. … канд. тех. наук : 05.07.05 / А. И. Лисицын. – Рыбинск., 2015. – 128 л.
9. Шмелев, А. В. Разработка математической модели взаимодействия элементов качения и кольца шарикового подшипника / А. В. Шмелев, С. Ю. Котов, Г. Я. Беляев // Вестн. Белорусско-Российского университета. – 2015. – № 4(49). – С. 94-102.
10. Шмелев, А. В. Численное исследование напряженно-деформированного состояния деталей подшипников качения / А. В. Шмелев, С. Ю. Котов, Г. Я. Беляев // Вестн. ГГТУ ИМ. П. О. Сухова. Машиностроение и машиноведение. – 2017. – № 1. – С. 27-33.
11. Черменский, О. Н. Подшипники качения: справочник-каталог / О. Н. Черменский, Н. Н. Федотов. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.
12. Биргер И. А. и др. Расчет на прочность деталей машин: Справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1993. – 354 с.
13. Двигатель Д-30 КП-2. Инструкция по технической эксплуатации. – М.: НПО Сатурн, 2007. – 996 с.

REFERENCES

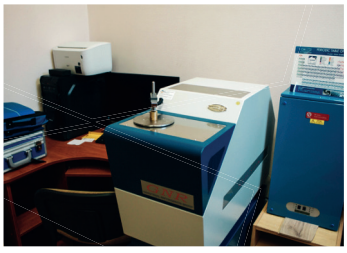
1. Analysis of the impact of reliability on flight safety by type of aircraft. – M .: State Center for Flight Safety. – 2009. – 48 p.
2. Grechishnikov, O. V. Ensuring the performance of a roller bearing / O. V. Grechishnikov, A. Yu. Balakin, A. D. Roslyakov // Bulletin of the Samara State Aerospace University. – 2013. – No. 3 (41). – P. 48-56.
3. Belomytsev, O. M. On improving the methodology for calculating aircraft rolling bearings of gas turbine engines / O.M. Belomyttsev // Bulletin of PNRPU. Aerospace engineering. – 2021. – No. 67. – P. 35-42.
4. Petrova, T. V. Analysis of the destruction of the radial power take-off shaft of engines of the CFM56 family / T. V. Petrova // Bulletin of the St. Petersburg State University of Civil Aviation. – 2019. – P. 130-137.
5. Anurov, Yu. M. Ensuring life and reliability indicators of gas turbine engines for stationary use / Yu. M. Anurov [and etc.] // Eastern European Journal of Advanced Technologies. – 2011. – No. 51. – P. 4-8.
6. Zhukova, A. A. Monitoring of an aircraft engine for the presence of metal impurities in oil / A. A. Zhukova, E. A. Shaporova, S.O. Stoiko // Bulletin of BelSUT: science and transport. – 2021. – No. 1 (42). –P. 48-51.
7. Shaporova, E. A. Substantiation of a comprehensive assessment of the technical condition of a gas turbine engine based on tribodiagnostics / E. A. Shaporova, A. G. Kapustin, S. O. Stoico // Aviation Bulletin. – 2021. – No. 4. – P. 55-62.
8. Lisitsin, A.I. Improving the efficiency of designing oil cavities of GTE supports based on the method of numerical simulation of two-phase flow: author. Dis. … cand. Those. Sciences: 05.07.05 / A. I. Lisitsyn. – Rybinsk., 2015. – 128 p.
9. Shmelev, A. V. Development of a mathematical model for the interaction of rolling elements and a ball bearing ring / A. V. Shmelev, S. Yu. Kotov, G. Ya. Belyaev // Bulletin of the Belarusian-Russian University. – 2015. – No. 4 (49). – P. 94-102.
10. Shmelev, A. V. Numerical study of the stress-strain state of rolling bearing parts / A. V. Shmelev, S. Yu. Kotov, G. Ya. Belyaev // Vestnik GGTU IM. ON. Sukhov. Mechanical engineering and machine science. – 2017. – No. 1. – P. 27-33.
11. Chermensky, O. N. Rolling bearings: directory-catalogue / O. N. Chermensky, N. N. Fedotov. – M.: Mashinostroenie, 2003. – 576 p.
12. Birger, I. A. Calculation of the strength of machine parts: Reference book / I. A. Birger, B. F. Schorr, G. B. Iosilevich. – 4th ed., revised. – M.: Mashinostroenie, 1993. – 354 p.
13. Engine D-30 KP-2. Instructions for technical operation. – M.: NPO Saturn, 2007. – 996 p.

Статья поступила в редакцию
20.04.2022

Лаборатория диагностики и прототипирования авиационных конструкций учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации» приглашает к сотрудничеству

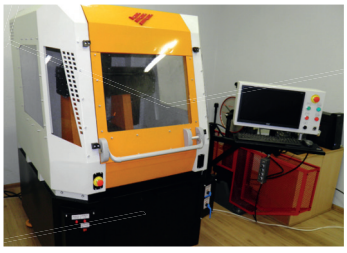


1. **Tescan Mira 3 LMH.** Новое поколение сканирующих электронных микроскопов с катодом Шоттки TESCAN MIRA сочетает в себе преимущества современных технологий: модернизированная электроника для ускоренного получения изображений; сверхбыстрая система сканирования с компенсацией статических и динамических аберраций изображения. Доступное увеличение микроскопа от 2 до 1 000 000. Возможность проведения энергодисперсионного микроанализа.



2. **Спектромер GNR Solaris CDD Plus.** Лабораторный оптико-эмиссионный спектрометр GNR Solaris CCD Plus в настоящий момент является лучшим в своем классе, значительно превосходя по точности все известные аналоги. Такие выдающиеся характеристики обусловлены самой большой вакуумной камерой, имеющей полную термостабилизацию, и вертикально расположенную оптической системы, улучшающей соотношение сигнал/шум и сохраняющей компактность прибора.

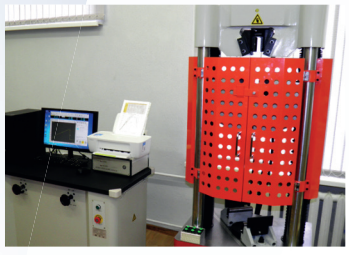
3. 3d-принтер Fortus 450mc. Трехмерная производственная система, позволяющая создавать точные воспроизводимые детали аддитивным способом на основе твердотельной трехмерной модели: авиационные, машиностроительные и строительные конструкции в масштабе для изучения опытных конструкций, технологические приспособления и инструменты и конечные детали, а также функциональные прототипы, которые выдерживают жесткое тестирование. Высокоэффективный материал Ultem используется для создания деталей фюзеляжа, крыльев благодаря высокой прочности и малому удельному весу.



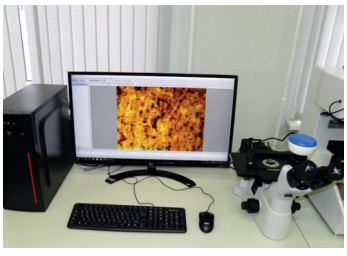
4. Трёхкоординатный фрезерный станок с ЧПУ Clever CNC Rh300. Предназначен для обработки легкообрабатываемых материалов с высокой точностью и производительностью. Пригоден для обработки стали и труднообрабатываемых материалов на щадящих режимах.

5. **3d-сканер Nikon Altera 7.5.5 с LC15 Dx.** Координатно-измерительная машина премиум-класса серии ALTERA. с лазерным сканированием сложных криволинейных поверхностей. Точность сканирования достигается до 1,8 мкм за счёт керамической конструкция с почти идеальной удельной жёсткостью и большой устойчивостью к изменениям температуры, гарантирующая исключительные и стабильные результаты в любых производственных условиях.

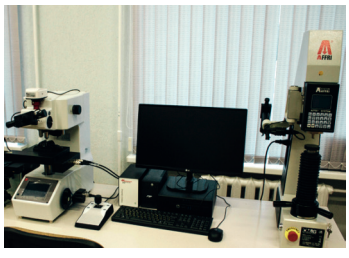
6. **Ультразвуковой дефектоскоп GE Phasor XS.** Предназначен для измерения толщины изделий, координат дефектов и амплитуд сигналов от них, оценки относительных размеров дефектов в сварных соединениях и основном материале, сосудов давления, котлов, транспортных и мостовых конструкций и других объектов. Переносной и прочный прибор объединяет преимущества фазированной решетки с обычным ультразвуковым дефектоскопом, отвечающим принятым нормам.



7. **Гидравлическая разрывная машина Kason WAW-300.** Испытательная гидравлическая разрывная машина предназначена для определения механических характеристик различных материалов при статическом растяжении, сжатии, изгибе и сдвиге. Машина применяется в металлургии, машиностроении, в производстве неметаллических материалов и изделий из них, в том числе при проведении научных исследований. Принцип действия машин серии WAW основан на преобразовании тензометрическим датчиком давления нагрузки, приложенной к испытываемому образцу, в электрический сигнал, изменяющийся пропорционально этой нагрузке.



8. **Металлографический комплекс Autoscan.** Предназначена для анализа изображений посредством визуального сравнения их с эталонными изображениями по некоторой заданной методике. Программное обеспечение имеет возможности: - создание составных изображений из набора изображений образца для получения более полной информации об образце; - приведение масштаба анализируемого изображения к масштабу эталонных изображений для их точного визуального сравнения на экране компьютера; - ручное измерение длин и площадей на анализируемом изображении.



9. **Твердомер аналоговый AFFRI-URBV-V.** Предназначен для измерения твердости металлов и сплавов, пластиков, мягкой и твердой резины по стандартизованным шкалам твердости Роквелла (HRA, HRB, HRC, HRN, HRT) по ГОСТ 9013-59, Виккерса (HV) по ГОСТ 2999-75, Бринелля (HB) по ГОСТ 9012-59.

10. **Твердомер AFFRI-MVDM8.** Предназначен для измерения микротвердости металлов и сплавов по шкалам Виккерса, в т. ч. поверхностных слоев металла при механической обработке, отдельных составляющих у структурно неоднородных сплавов, незначительных по толщине гальванических и других покрытий.

ЮРИДИЧЕСКИЕ НАУКИ

SL

УДК 656.2.08:342.951

А.А. ЕРОФЕЕВ, О.А. ТЕРЕЩЕНКО,
М.Ю. СТРАДОМСКИЙ

ПРИМЕНЕНИЕ МЕЖДУНАРОДНОГО ОПЫТА НОРМАТИВНОГО ПРАВОВОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ В СИСТЕМЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Александр Александрович Ерофеев *– кандидат технических наук, доцент, проректор по научной работе учреждения образования «Белорусский государственный университет транспорта», Республика Беларусь*
erofeev_aa@bsut.by

Олег Анатольевич Терещенко *– старший преподаватель кафедры «Управление эксплуатационной работой и охрана труда» учреждения образования «Белорусский государственный университет транспорта», Республика Беларусь*
uer@bsut.by

Михаил Юрьевич Страдомский *– младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Управление перевозочным процессом» учреждения образования «Белорусский государственный университет транспорта», Республика Беларусь*
mistr@bsut.by

Alexander Erofeev *– Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Vice-Rector for Scientific Work of Belarusian State University of Transport, Republic of Belarus*
erofeev_aa@bsut.by

Oleg Tereshchenko *– Senior lecturer of the department «Management of operational work and labor protection» of Belarusian State University of Transport, Republic of Belarus*
uer@bsut.by

Mikhail Stradomsky *– Junior Researcher of the Research Laboratory «Transportation Process Management» of Belarusian State University of Transport, Republic of Belarus*
mistr@bsut.by

Аннотация: *в статье представлен анализ опыта международных организаций, объединений и государств в сфере регулирования вопросов обеспечения транспортной безопасности. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости систематизации национального законодательства Республики Беларусь в данной сфере согласно мировым тенденциям. Центральное положение в новой системе должен занять предлагаемый к разработке Закон Республики Беларусь «О транспортной безопасности».*
Ключевые слова: *транспортная безопасность, международный опыт, нормативное правовое обеспечение, анализ, предложения.*

Abstract: *the paper presents an analysis of international organizations experience, associations and states in the field of transport security issues regulation. The results demand to systematize the Belarussian legislation in this area in accordance with global trends. The central position in the new system should be occupied by the Law of the Republic of Belarus «About transport security» that proposed for development.*
Keywords: *transport security, international experience, legal support, analysis, proposals.*

Транспортной безопасности, как состоянию защищенности объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств от актов незаконного вмешательства, в последнее время уделяется повышенное внимание. Ее комплексное обеспечение является сложной технологической, информационной и ресурсоемкой задачей.

В Республике Беларусь развитая система обеспечения транспортной безопасности характерна для воздушного транспорта в силу его особенностей. На других видах транспорта задача транспортной безопасности решается в рамках единой системы обеспечения общественной безопасности без достаточного учета специфики.

Государственное регулирование вопросов обеспечения транспортной безопасности в Республике Беларусь осуществляется на уровнях: международных соглашений (в рамках интеграционных объединений); национального законодательства; локальных нормативных правовых актов.

В Республике Беларусь ратифицирована **Стратегия обеспечения транспортной безопасности на территориях государств – участников Содружества Независимых Государств при осуществлении перевозок в международном сообщении** [1]. Ее целью является выработка и реализация государствами – участниками СНГ согласованной системы правовых, экономических, организационных и иных мер, направленных на устойчивое и безопасное функционирование транспортного комплекса при перевозках пассажиров и грузов в международном сообщении и соответствующих угрозам совершения актов незаконного вмешательства.

Опираясь на положения Стратегии в качестве цели проводимого исследования выбрана оценка вопросов государственного регулирования транспортной безопасности за рубежом для принятия решения о дальнейшем совершенствовании нормативной правовой базы Республики Беларусь.

Оценка системы регулирования вопросов обеспечения транспортной безопасности за рубежом

В практике мирового сообщества вопросы транспортной безопасности рассматриваются как часть коллективной и национальной безопасности с уклоном на ее дифференцированное регулирование по видам транспорта и направлениям деятельности.

Регулирование вопросов обеспечения транспортной безопасности, как составной части общей системы безопасности, осуществляется на двух основных уровнях:

- *наднациональном (акты Организации Объединенных Наций, Европейского союза, Содружества Независимых Государств, Союзного государства России и Беларуси и др.);*
- *национальном (суверенное законодательство государств).*

Кроме того, оставаясь за рамками регулирования, вопросы транспортной безопасности координируются и решаются на корпоративном уровне в рамках внутренней маркетинговой политики по предоставлению услуг с обеспечением повышенного уровня безопасности.

В **Организации Объединенных Наций** (ООН) основным приоритетом в сфере безопасности (в разрезе влияния на транспортную безопасность) является борьба с терроризмом. Источники обязательных требований и рекомендаций, образующих универсальную правовую основу по борьбе с терроризмом в рамках ООН, могут быть разделены на три группы.

Резолюции Генеральной Ассамблеи ООН

Принятые резолюции не имеют обязательной силы, однако они вместе с (не имеющими обязательной силы) резолюциями Совета Безопасности ООН составляют авторитетные рекомендации, а употребляемые в них формулировки часто используются при разработке последующих обязательных документов.

В 2006 году Генеральная Ассамблея ООН приняла **Глобальную контртеррористическую стратегию** [2], которая состоит из резолюции и прилагаемого Плана действий, направленного на укрепление национальных, региональных и международных действий по борьбе с терроризмом. В Стратегии воплощена первая попытка всех государств-членов ООН договориться об общем стратегическом подходе к предупреждению и пресечению терроризма на основе решимости предпринять практические шаги как в индивидуальном, так и в коллективном плане. В Стратегии также предусмотрен ряд важных инициатив, включая:

- *повышение согласованности и эффективности оказания технической помощи в области борьбы с терроризмом;*
- *устранение угрозы биологического терроризма посредством создания единой базы данных о биологических инцидентах;*
- *разработку инновационных методов борьбы с угрозой использования террористами Интернета;*
- *модернизацию систем пограничного и таможенного контроля и повышение степени защиты проездных документов с целью предотвращения поездок террористов и перемещения незаконных материалов.*

Кроме того, государствам-членам предложено принять аналогичный комплексный подход к борьбе с терроризмом на национальном уровне.

Резолюции Совета Безопасности ООН

В основном они принимаются на положениях главы VII Устава ООН, которая касается поддержания международного мира и безопасности. Эти резолюции часто содержат обязывающие формулировки для всех государств-членов и налагают на них ряд ограничений.

Универсальные документы по борьбе с терроризмом

Такими документами являются многосторонние конвенции и протоколы, касающиеся терроризма, которые требуют от государств-участников борьбы с конкретными проявлениями терроризма (в том числе посредством обязательств ввести уголовную ответственность за конкретные деяния) и служат основой для международного сотрудничества. Среди них: «Конвенция о преступлениях и некоторых других актах, совершаемых на борту воздушных судов», «Конвенция о борьбе с незаконным захватом воздушных судов», «Международная конвенция о борьбе с захватом заложников», «Конвенция о борьбе с незаконными актами, направленными против безопасности морского судоходства», «Международная Конвенция о борьбе с бомбовым терроризмом» и другие [3].

В **Европейском союзе** (ЕС)

специфика обеспечения транспортной безопасности состоит в основном в децентрализованном нормативном правовом обеспечении транспортной безопасности (с разделением по видам транспорта и странам) в поле централизованного противодействия терроризму.

В области борьбы с терроризмом институтами ЕС принимаются правовые акты и другие меры, предусматривающие усиление противодействия терроризму уголовно-правовыми, организационными, финансовыми и иными средствами. Система и основные направления соответствующих мер были определены в Общей позиции Совета от 27 декабря 2001 г. о борьбе с терроризмом 2001/930/ОВПБ [4] и в других документах ЕС, одобренных руководителями государств-членов в рамках Европейского совета: «Стокгольмская программа», «План действий по борьбе с терроризмом», «Стратегия Европейского Союза по борьбе с терроризмом», «Стратегия борьбы с финансированием терроризма» и др.

В ЕС централизованный подход по обеспечению транспортной безопасности основывается на определении объектов критической инфраструктуры транспорта (как составной части общей критической инфраструктуры) [5].

За основу анализа опасностей, категорирования объектов и реализации мер физической и инженерной защиты в ЕС принята методология риск-менеджмента. Согласно Директиве Совета ЕС 2008/114 [6], значения показателей защищенности объектов транспортной инфраструктуры оцениваются с помощью соответствующих критериев для объектов транспорта (автодорожный, железнодорожный, воздушный, речной, морской и порты) и энергетики, а также в зависимости от вида инфраструктурного объекта. Выбор объектов критической инфраструктуры проводился каждой страной-участницей с 2008 г. и был завершен в 2011 г. Каждое государство в зависимости от различных факторов самостоятельно определяло количество объектов критической инфраструктуры и делало их анализ.

В рамках **Содружества Независимых Государств** транспортную безопасность регулируют следующие нормативные правовые акты [7]:

- *«Стратегия обеспечения транспортной безопасности», которая принята с целью выработки и реализации государствами — участниками СНГ согласованной системы правовых, экономических, организационных и иных мер, направленных на устойчивое и безопасное функционирование транспортного комплекса при перевозках пассажиров и грузов в международном сообщении и соответствующих угрозам совершения актов незаконного вмешательства;*
- *«Соглашение об информационном взаимодействии в области транспортной безопасности», принятое с целью гармонизации законодательства о транспортной безопасности, в том числе в целях создания благоприятных условий для эффективной эксплуатации и развития участков международных транспортных коридоров, проходящих по территориям государств — участников СНГ;*
- *«Декларация по вопросам обеспечения безопасности на транспорте в государствах — участниках Содружества Независимых Государств», направленная на повышение эффективности борьбы с терроризмом и обеспечение безопасности на транспорте, за счет осуществления комплекса мер на национальном и международном уровнях, включающих заключение международных договоров и расширение сферы их действия на сотрудничество компетентных органов и неправительственных организаций государств — участников СНГ.*

Основополагающие документы **Союзного государства России и Беларуси** «Договор о дружбе, добрососедстве и сотрудничестве между Российской Федерацией и Республикой Беларусь», «Декларация о дальнейшем единении Республики Беларусь и Российской Федерации», «Программа действий Российской Федерации и Республики Беларусь по реализации положений Договора о создании Союзного государства», «Договор о создании Союзного государства» декларируют общие вопросы добрососедства и сотрудничества в сфере безопасности без отдельного упоминания транспортной безопасности [8].

Для правового регулирования вопросов обеспечения транспортной безопасности во многих странах приняты соответствующие законодательные акты.

В **Соединенных Штатах Америки** 19 ноября 2001 г. принят «Закон об авиационной и транспортной безопасности» [9], в рамках которого создана Администрация транспортной безопасности TSA — структурное подразделение Министерства внутренней безопасности DHS. Закон установил ряд профилактических мер, направленных на недопущение захвата воздушных судов террористами: жесткий досмотр пассажиров в зоне контроля аэропорта вплоть до использования мобильных полиграфов для проведения экспресс-опроса; передачу списка пассажиров в правоохранительные органы для предварительного изучения; внедрение службы авиационных маршалов, уполномоченных на ношение оружие.

В рамках закона Администрации транспортной безопасности TSA была поручена разработка политики безопасности американской транспортной системы. В состав TSA входят около 60 тыс. сотрудников службы безопасности, инспекторов, воздушных маршалов и менеджеров, которые защищают транспортные системы страны, проверяя наличие взрывчатых веществ на контрольно-пропускных пунктах в аэропортах, осматривая железнодорожные вагоны, патрулируя метро с партнерами из правоохранительных органов и работая над обеспечением безопасности всех видов транспорта. Также не исключается привлечение в качестве сил обеспечения транспортной безопасности частных организаций. При этом такие организации должны получить одобрение и выполнять процедуры TSA.

В **Великобритании** 10 июля 2003 г. принят «Закон о железной

дороге и транспортной безопасности» [10]. Цели закона включают: создание Отделения по расследованию железнодорожных аварий; замену Регулятора железнодорожного транспорта Советом по регулированию и Управлением регулирования железнодорожного транспорта; создание Органа полиции для контроля Британской транспортной полиции BTP; наделение BTP законными полномочиями в отношении железнодорожного транспорта.

В **Китайской Народной Республике** транспортная безопасность обеспечивается в рамках общей системы безопасности, основанной главным образом на Законе КНР «О государственной безопасности» [11]. Безопасность и порядок на транспорте в Китае обеспечивает народная полиция (в составе Министерства общественной безопасности КНР) в соответствии с Законом о народной полиции КНР [12]. В составе народной полиции функционирует криминальная полиция, полиция общественной безопасности, полиция по контролю за дорожным движением, железнодорожная полиция, речная и морская полиция, полиция по охране народнохозяйственных объектов, полиция по охране лесов.

Отличительной особенностью правоохранительных органов КНР, осуществляющих деятельность на объектах транспорта, является их двойное подчинение Министерству общественной безопасности КНР в части оперативно-служебной деятельности и Министерству транспорта КНР (по видам транспорта) в организационном плане, что позволяет собственникам объектов транспортной инфраструктуры эффективно использовать правоохранительные органы для обеспечения безопасности на своих объектах. Таким образом, весь комплекс мероприятий по обеспечению транспортной безопасности гарантируется народной полицией КНР, так как сотрудники народной полиции осуществляют общее руководство всеми силами безопасности на транспорте, в которые, помимо самой народной полиции, входят службы железнодорожной охраны и службы безопасности аэропортов. Кроме того, Министерство транспорта КНР осуществляет руководство правоохранительными органами по организационно-штатным вопросам и их материально-техническому обеспечению для высокой мобилизационной готовности правоохранительных органов и должного уровня транспортной безопасности на объектах транспорта.

Подразделения железнодорожной народной полиции КНР осуществляют сопровождение товарных поездов по маршрутам их следования, в связи с чем преступления, связанные с хищениями грузов с подвижного состава, являются исключительными случаями, поэтому в железнодорожной народной полиции КНР отсутствуют подразделения по борьбе с преступными посягательствами на грузы. Норма присутствия на объектах железнодорожного транспорта составляет один сотрудник полиции (в том числе из числа сотрудников охраны) на три километра железнодорожного пути. Большинство вагонов скоростных поездов оборудованы системой видеофиксации, скоростные железнодорожные магистрали оборудованы высокими ограждениями, исключающими попадание посторонних лиц на участок железной дороги.

Следует отметить, что основная задача по выявлению запрещенных к обороту предметов среди пассажиропотока лежит на сотрудниках охраны, тогда как сотрудники правоохранительных органов обязаны незамедлительно прибыть на место происшествия для проведения процессуальных действий при поступлении соответствующих сигналов.

В **Республике Казахстан** транспортная безопасность является составной частью национальной безопасности и в соответствии с Законом РК от 21 декабря 1995 г. № 2710 «О национальной безопасности Республики Казахстан» относится к экономической безопасности [13]. Экономическая безопасность включает транспортную безопасность, предусматривающую состояние защищенности транспортной отрасли экономики от реальных и потенциальных угроз, при котором государство способно обеспечить создание условий для удовлетворения потребностей экономики и населения в перевозках автомобильным, железнодорожным, воздушным, морским и речным видами транспорта и связанных с ними услугами, формирование и развитие транспортной инфраструктуры, а также устойчивое развитие и обеспечение конкурентоспособности транзитного потенциала.

В **Украине** специализированный закон в области транспортной безопасности на сегодняшний день не принят. В Законе Украины от 10 ноября 1994 г. № 232/94-ВР «О транспорте» [14] безопасности на транспорте посвящена одна статья (статья 16). При этом Закон не определяет понятие транспортной безопасности, устанавливает обязанность и ответственность субъектов по обеспечению безопасности, вопросы осуществления контроля и надзора за обеспечением безопасности движения транспортных средств.

В **Российской Федерации** Министерством транспорта разработана и принята 3 мая 2006 г. «Государственная концепция обеспечения транспортной безопасности России» [15], которая является основным (исходным) государственным доктринальным документом, определяющим содержание государственной политики в области обеспечения транспортной безопасности [16]. Концепция определяет цели, задачи, принципы, ресурсные источники, основные мероприятия обеспечения транспортной безопасности и их временные рамки, устанавливает единый понятийный и терминологический аппарат в области транспортной безопасности, направлена на формирование системы (структура органов и организаций и их полномочия) обеспечения транспортной безопасности. Концепция согласуется с государственными документами более общего характера в области безопасности и транспортной политики.

Для реализации положений Концепции в РФ принят Федеральный закон от 09.02.2007 № 16-ФЗ «О транспортной безопасности» [17]. Согласно 16-ФЗ, основными задачами обеспече-

ния транспортной безопасности являются:

- *нормативное правовое регулирование в области обеспечения транспортной безопасности;*
- *определение угроз совершения актов незаконного вмешательства;*
- *оценка уязвимости объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств;*
- *категорирование объектов транспортной инфраструктуры;*
- *разработка и реализация требований по обеспечению транспортной безопасности;*
- *разработка и реализация мер по обеспечению транспортной безопасности;*
- *подготовка и аттестация сил обеспечения транспортной безопасности;*
- *осуществление федерального государственного контроля (надзора) в области обеспечения транспортной безопасности;*
- *информационное, материально-техническое и научно-техническое обеспечение транспортной безопасности;*
- *сертификация технических средств обеспечения транспортной безопасности.*

Следует отметить, что в Федеральном законе «О транспортной безопасности» понятие «транспортная безопасность» дается в узком смысле, т.е. ограничивается защитой объектов транспортной инфраструктуры от актов незаконного вмешательства, в том числе от террористического акта. В нем не учтены факторы, которые обеспечивают безопасность для общества при пользовании транспортными услугами: техническая исправность транспортных средств, соответствие современным техническим требованиям транспортной инфраструктуры, безопасность эксплуатации транспортных средств (человеческие факторы), создание условия комфортности для пассажиров при осуществлении перевозки в целях снижения риска причинения вреда жизни или здоровью граждан.

Заключение

В настоящее время в Республике Беларусь нет единой системы государственного регулирования в сфере транспортной безопасности. Отдельные актуальные задачи обеспечения транспортной безопасности при осуществлении транспортной деятельности воздушным, железнодорожным, городским электрическим, автомобильным, внутренним водным видами транспорта регламентированы Указами Президента Республики Беларусь, Кодексами, Законами Республики Беларусь и, главным образом, отраслевыми нормативными правовыми актами, правовые нормы которых имеют различную юридическую силу.

Анализ показал, что проблеме обеспечения транспортной безопасности и ее нормативному правовому обеспечению в мировой практике уделяется значительное внимание как на уровне интеграционных объединений (в том числе тех, в которых состоит Республика Беларусь), так и на уровне отдельных государств.

Термин «транспортная безопасность» широко и разносторонне трактуется в различных правовых системах, что требует проведения работы, направленной на его включение в нормативное правовое поле Республики Беларусь в оптимальной (единой) интерпретации.

С учетом вышеизложенного, следует отметить необходимость систематизации действующего национального законодательства Республики Беларусь в сфере обеспечения транспортной безопасности и, в связи с этим, предлагается разработать Закон Республики Беларусь «О транспортной безопасности». В законе должны быть закреплены правовые основы государственной системы транспортной безопасности, понятийный аппарат.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Решение о Стратегии обеспечения транспортной безопасности на территориях государств – участников Содружества Независимых Государств при осуществлении перевозок в международном сообщении [Электронный ресурс] // Национальный центр правовой информации Республики Беларусь. – Режим доступа: https://www.etalonline.by/document/?regnum=n91500124. – Дата доступа: 03.03.2022.
2. Глобальная контртеррористическая стратегия ООН [Электронный ресурс] // Организации Объединенных Наций. – Режим доступа: https://www.un.org/counterterrorism/ru/un-global-counter-terrorism-strategy. – Дата доступа: 03.03.2022.
3. Конвенции и соглашения за 2010–2019 годы [Электронный ресурс] // Декларации, конвенции, соглашения и другие правовые материалы. – Режим доступа: https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conv2010.shtml. – Дата доступа: 24.02.2022.
4. Общая позиция Совета Европейского союза от 27 декабря 2001 г. о применении конкретных мер по борьбе с терроризмом [Электронный ресурс] // Официальный журнал Европейских Сообществ. – Режим доступа: https://www.refworld.org.ru/publisher,COUNCIL,,,56f8ef6f4,0.html. – Дата доступа: 15.02.2022.
5. Трофименко, Ю. В. Методические подходы к обеспечению транспортной безопасности в России и странах Европейского союза / Ю. В. Трофименко // Транспорт Российской Федерации. – 2011. – № 6 (37). – С. 24-29.
6. Директива Совета Европейского Союза 2008/114/ЕС от 08.12.2008 о европейских критических инфраструктурах и мерах по их защите [Электронный ресурс] // Портал ГАРАНТ.РУ. – Режим доступа: http://base.garant.ru/70333008. – Дата доступа: 15.02.2022.
7. Единый реестр правовых актов и других документов Содружества Независимых Государств [Электронный ресурс] // Исполнительный комитет СНГ. – Режим доступа: https://cis.minsk.by/reestr/ru/index.html. – Дата доступа: 15.02.2022.
8. Документы Союзного государства [Электронный ресурс] // Информационно-аналитический портал Союзного государства. – Режим доступа: https://soyuz.by/dokumenty-soyuznogo-gosudarstva. – Дата доступа: 16.02.2022.
9. Aviation and Transportation Security Act. [Электронный ресурс] // govinfo. – Режим доступа: https://www.govinfo.gov/app/details/PLAW-107publ71/related. – Дата доступа: 16.02.2022.
10. Railways and Transport Safety Act 2003 [Электронный ресурс] // The National Archives. – Режим доступа: https://www.legislation.gov.uk/ukpga/2003/20/contents. – Дата доступа: 16.02.2022.

11. Закон КНР «О государственной безопасности» [Электронный ресурс] // Chinalaw.center. – Режим доступа: https://chinalaw.center/constitutional_law/china_state_security_law_2015_russian. – Дата доступа: 15.02.2022.
12. Закон КНР «О народной полиции» [Электронный ресурс] // UGL Corporation Ltd. – Режим доступа: http://law.uglc.ru/police.htm. – Дата доступа: 15.02.2022.
13. Правовые аспекты обеспечения безопасности на транспорте: сравнительно-правовой анализ законодательства стран СНГ [Электронный ресурс] // Z-Library. – Режим доступа: https://ur.booksc.eu/dl/36501484/b02438. – Дата доступа: 11.03.2022.
14. Верховна Рада України: Закон про транспорт [Электронный ресурс] // Інформаційно-аналітична система Консультант. – Режим доступа: http://consultant.parus.ua/?doc=09WY831004. – Дата доступа: 11.03.2022.
15. Государственная концепция обеспечения транспортной безопасности России [Электронный ресурс] // Портал ГАРАНТ.РУ. – Режим доступа: http://base.garant.ru/188579. – Дата доступа: 24.02.2022.
16. Ильясова, Г.А. Правовые аспекты обеспечения безопасности на транспорте: сравнительно-правовой анализ законодательства стран СНГ // Международный журнал экспериментального образования. – 2014. – № 1-2. – С. 140-143.
17. Федеральный закон «О транспортной безопасности» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_66069. – Дата доступа: 24.02.2022.

REFERENCES

1. Decision on the Strategy for Ensuring Transport Security in the Territories of the CIS Members in the implementation of transportation in international traffic [Electronic resource] // National Center for Legal Information of the Republic of Belarus. – Access mode: https://www.etalonline.by/document/?regnum=n91500124. – Access date: 03/03/2022
2. UN Global Counter-Terrorism Strategy [Electronic resource] // United Nations. – Access Mode: https://www.un.org/counterterrorism/en/un-global-counter-terrorism-strategy. – Access date: 03/03/2022.
3. Conventions and agreements for 2010–2019 [Electronic resource] // Declarations, conventions, agreements and other legal materials. – Access mode: https://www.un.org/en/documents/decl_conv/conv2010.shtml. – Access date: 02/24/2022.
4. Council Common Position of 27 December 2001 on the application of specific measures to combat terrorism [Electronic resource] // Official Journal of the European Communities. – Access mode: https://www.refworld.org.ru/publisher,COUNCIL,,,56f8ef6f4,0.html. – Access date: 02/15/2022.
5. Trofimenko, Yu. V. Methodological approaches to ensuring transport security in Russia and the countries of the European Union / Yu. V. Trofimenko // Transport of the Russian Federation. – 2011. – No. 6 (37). – P. 24-29.
6. Directive 2008/114 - Identification and designation of European critical infrastructures and the assessment of the need to improve their protection [Electronic resource] // GARANT.RU portal. – Access mode: http://base.garant.ru/70333008. – Access date: 02/15/2022.
7. Unified register of legal acts and other documents of the Commonwealth of Independent States [Electronic resource] // CIS Executive Committee. – Access mode: https://cis.minsk.by/reestr/ru/index.html. – Access date: 02/15/2022.
8. Union State documents [Electronic resource] // Union State information and analytical portal. – Access mode: https://soyuz.by/dokumenty-soyuznogo-gosudarstva. – Access date: 02/16/2022.
9. Aviation and Transportation Security Act. [Electronic resource] // govinfo. – Access mode: https://www.govinfo.gov/app/details/PLAW-107publ71/related. – Access date: 16.02.2022.
10. Railways and Transport Safety Act 2003 [Electronic resource] // The National Archives. – Access mode: https://www.legislation.gov.uk/ukpga/2003/20/contents. – Access date: 16.02.2022.
11. The People's Republic of China Law «On State Security» [Electronic resource] // Chinalaw.center. – Access mode: https://chinalaw.center/constitutional_law/china_state_security_law_2015_english. – Access date: 02/15/2022.
12. The People's Republic of China Law «On the People's Police» [Electronic resource] // UGL Corporation Ltd. – Access mode: http://law.uglc.ru/police.htm. – Date of access: 02/15/2022.
13. Legal aspects of transport security: a comparative legal analysis of the CIS legislation [Electronic resource] // Z-Library. – Access mode: https://ur.booksc.eu/dl/36501484/b02438. – Access date: 03/11/2022.
14. Verkhovna Rada of Ukraine: Law on Transport [Electronic resource] // Information and Analytical System Consultant. – Access mode: http://consultant.parus.ua/?doc=09WY831004. – Access date: 11.03.2022.
15. State Concept for Ensuring Transport Security in Russia [Electronic resource] // GARANT.RU Portal – Access mode: http://base.garant.ru/188579. – Access date: 02/24/2022.
16. Ilyasova, G.A. Legal Aspects of Ensuring Security in Transport: Comparative Legal Analysis of the CIS Legislation // International Journal of Experimental Education. – 2014. – No. 1-2. – P. 140-143.
17. Federal law «On transport security» [Electronic resource] // ConsultantPlus. – Access mode: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_66069. – Access date: 02/24/2022.

Статья поступила в редакцию
22.03.2022

ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К СТАТЬЯМ ДЛЯ ОПУБЛИКОВАНИЯ

К публикации в журнале принимаются оригинальные, достоверные и обоснованные материалы, которые имеют научное и практическое значение, отличаются актуальностью и новизной.

Объем текста статьи должен составлять не менее 14 тыс. печатных знаков, но не превышать 30 тыс. печатных знаков (8–14 стр.).

Статья должны быть выполнена в текстовом редакторе MS Word и отредактирована строго по следующим параметрам: ориентация листа — книжная, формат А4, поля по 2 см по периметру страницы, шрифт Times New Roman, размер шрифта для всей статьи, кроме аннотации, ключевых слов и таблиц — 14 пт, размер шрифта для таблиц — 12 пт, размер шрифта для аннотации и ключевых слов — 10 пт, междустрочный интервал — 1.0, выравнивание по ширине страницы, абзацный отступ — 1,25 см (без использования клавиш «Tab» или «Пробел»). Выделения в тексте возможны только полужирным шрифтом и (или) курсивом. Внутренние подзаголовки необходимо центрировать.

В структуру статьи входит:

1. **УДК** (номер тематической рубрики). Располагается отдельной строкой слева.

2. **Название статьи.** Должно содержать до 12 слов. Не допускается использовать в названии аббревиатуры и формулы. (Располагается по центру, начертание — полужирное, прямое).

3. **Инициалы и фамилия автора** (авторов).

4. **Аннотация.** Рекомендуемый средний объем аннотации составляет 500 печатных знаков, но не более 900, которая должна кратко отражать структуру статьи и быть информативной.

5. **Ключевые слова** должны содержать 5–10 слов или 3–5 словосочетаний, которые отделяются друг от друга запятой.

6. Далее в той же последовательности идет **блок информации** (пункты 2–5) на *английском языке.* Если статья англоязычная — вышеуказанные данные приводятся на русском языке.

7. **Текст статьи**, в который также могут входить рисунки и таблицы.

Таблицы набираются в редакторе MS Word. Таблицы должны иметь номера и названия, которые должны быть указаны над таблицами. Единственная таблица в публикации не нумеруется. Использованные в таблице сокращения подлежат расшифровке в конце таблицы.

Графический материал (рисунки, чертежи, схемы, фотографии) должны представлять собой обобщенные материалы исследований. Графический материал должен размещаться сразу же после ее первого упоминания в тексте, а также должен быть предоставлен в хорошем качестве в отдельных файлах в формате .jpg/ .png/ .cdr/ или .psd (Adobe Photoshop, без склеивания слоев) с разрешением не ниже 300 dpi. Названия и номера графического материала должны быть указаны под изображением. Элементы рисунков и кривые нумеруются курсивными арабскими цифрами, которые расшифровываются в подрисуночных подписях. Единственный рисунок в статье не нумеруется.

Формулы и математические символы. Простые формулы и буквенные обозначения величин нужно вставлять, используя меню «Вставка. Символ». Сложные формулы набираются с помощью встроенного в MS Word редактора формул MathType. Нумеруются только те формулы, на которые автор ссылается по тексту.

Иллюстрации, формулы и сноски следует пронумеровать в соответствии с порядком цитирования в тексте.

Аббревиатуры. В тексте следует использовать только общепринятые сокращения (аббревиатуры). Полный термин, вместо которого вводится сокращение, следует расшифровывать при первом упоминании его в тексте.

Приводимые статистические данные, факты, цитаты, имена собственные и другие сведения должны быть обеспечены ссылками на источники. В тексте пишутся в квадратных скобках (например, [1]).

8. **Список использованных источников** должен включать в себя все работы, использованные автором в тексте и оформлен в соответствии с требованиями Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь. Каждый источник должен иметь свой порядковый номер в списке. Количество литературных источников — 10-15.

9. **Информация об авторах предоставляется на двух языках – английский и русский/белорусский:**

- фамилия, имя, отчество авторов (без сокращений);
- ученая степень, ученое звание (полное/сокращенное);
- должность, наименование учреждений, где работают авторы (полное/сокращенное) с указанием города и страны;
- контактные данные каждого автора (телефон,e-mail).

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.

РУБРИКИ ЖУРНАЛА

- Технические науки
(проектирование и эксплуатация авиационной техники, навигация и управление воздушным транспортом, авиационная безопасность и безопасность полетов);

- Педагогические науки
(профессиональная подготовка авиационных специалистов, развитие профессионального образования);

- Юридические науки
(правовое регулирование в области гражданской авиации)

УСЛОВИЯ ОПУБЛИКОВАНИЯ В ЖУРНАЛЕ

Для опубликования статьи в журнале необходимо представить:

1. Экспертное заключение о возможности опубликования в открытых источниках печати в электронном виде в формате pdf (оригинальные экспертные заключения необходимо обязательно предоставить в оргкомитет).
2. Статьи о результатах работ, проведенных в научных учреждениях, должны иметь разрешение на опубликование (сопроводительное письмо ректората или дирекции, либо выписку из протокола заседания ученого совета, отдела или кафедры).
3. Анкету автора (форму можно посмотреть на сайте академии в разделе НАУКА → Журнал «Авиационный вестник»).
4. Материалы статьи и сопроводительные документы представляются в электронном и письменном виде согласно установленным требованиям.
   - Электронную версию материалов присылать по адресу: avia.vestnik@bgaa.by. В названии файла указывать фамилию автора (либо соавторов через запятую) в именительном падеже, а также первые два-три слова из названия статьи.
   - Бумажный вариант статьи, подписанный всеми авторами (подписи должны быть заверены) направлять по адресу редакционной коллегии с пометкой «Научно-практический журнал «Авиационный вестник».

Языки материала статьи: белорусский, русский, английский.

Плата за публикацию не взимается.

Электронная версия журнала будет опубликована на сайте учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации»:

bgaa.by

Журнал включен в перечень Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам (эксплуатация воздушного транспорта, навигация и управление воздушным транспортом) согласно приказу Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь №94 от 01.04.2014 (в редакции приказа Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь 16.02.2021 № 36).

Журнал включен в РИНЦ (Российский индекс научного цитирования) Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU

АДРЕС РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

220096, г. Минск, ул. Уборевича, 77
Учреждение образования «Белорусская государственная академия авиации»
Телефон: +375 (17) 354-32-34
e-mail: avia.vestnik@bgaa.by

Подписано в печать с утвержденного макета 08.07.2022 г. Дата выхода 13.07.2022 г. Формат 60x84 1/8.
Бумага мелованная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 5,35. Заказ №4955 от 08.07.2022 г.
Тираж 100 экз. Адрес редакции: г. Минск, ул. Уборевича, 77.
Отпечатано в типографии УП «Донарит». Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 2/108 от 07.04.2014. 220030, г. Минск, ул. Октябрьская, 25, www.donarit.com Публикуемые материалы отражают мнение их авторов.