

№ 13 ДЕКАБРЬ 2025  
ISSN 2707-6989

БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ  
АКАДЕМИЯ АВИАЦИИ

# АВИАЦИОННЫЙ ВЕСТНИК

*The aviation  
herald*

THE AVIATION HERALD, 2025, no. 13

АВИАЦИОННЫЙ ВЕСТНИК. 2025. № 13

Научно-практический журнал

## СОДЕРЖАНИЕ

### АВИАЦИЯ В ЛИЦАХ

Сирень цвета военного неба. Авиационные сорта сирени ... 2

### ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

*Л. И. Гречихин.* Тепловой насос на основе работающей турбины ..... 8

*И. Н. Абдуллин, М. М. Васвиев, А. И. Шкаленко.* Беспилотные воздушные суда с раскрывающимися крыльями: трансформация гражданских технологий и новые возможности ..... 14

*А. И. Кириленко, В. Г. Шуруй.* Низкие уровни радиации в авиации и окружающей среде ..... 20

*В. П. Голубев, Н. Е. Шевчик, Д. В. Дегтерев, А. Н. Асадчий, М. В. Малько, С. В. Василевич, С. О. Стойко.* Оборудование термической конверсии органических отходов авиационной отрасли с применением СВЧ-технологии ..... 26

*П. В. Иванишин, А. А. Санько, М. А. Басов, Е. Л. Русакович, В. А. Потапов.* Анализ влияния инструментальных погрешностей измерений датчиков бесплатформенной инерциальной навигационной системы на точность наведения высокодинамического объекта ..... 32

*А. В. Солодуха.* Управление воздушным движением на основе траекторий: проблемы построения и перспективы решения . . . 38

*А. А. Санько, В. А. Потапов.* Контроль технического состояния главного редуктора вертолета виброакустическим методом. .... 42

*А. И. Кириленко, О. С. Филиппенко.* Демонстрационный эксперимент по аэромеханике в курсе физики ..... 47

*О. Н. Скрипник, А. М. Мацкевич.* Оценка эффективности применения системы поддержки принятия решений в профессиональной подготовке диспетчеров по организации воздушного движения ..... 53

*В. В. Ковалевич, А. Г. Боровой.* Анализ точности определения дальности кинематическим методом ..... 61

### ЮРИДИЧЕСКИЕ НАУКИ

*О. Г. Колошич.* Безопасность полетов в международном воздушном праве ..... 68

### ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

*З. В. Машарский, О. С. Машарская.* Психофизиологические основы человеческих ошибок в авиационной деятельности ... 78

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

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ АВИАЦИИ»

Республика Беларусь, 220096, г. Минск, ул. Уборевича, 77  
Тел. +375 (17) 378 94 22, факс (017) 271 66 32  
academy@bsaa.by  
bgaa.by

#### Главный редактор:

*И. Г. Яцкевич*, к.и.н., доцент, 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. А. Шегидевич*, к.т.н., глава администрации Фрунзенского района города Минска, Республика Беларусь;

*А. А. Жукова*, к.т.н., Республика Беларусь.

#### Технический секретарь:

*С. О. Стойко*, начальник авиационного научно-технического центра БГАА, Республика Беларусь.

#### Редколлегия

##### Технические науки:

*С. А. Чижик*, академик НАН Беларуси, д.т.н., профессор, заведующий отделением теплообмена и механики микро- и наноразмерных систем Института тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, Республика Беларусь;

*А. П. Ласковнев*, 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. Хакдоод*, д.т.н., профессор, член-корреспондент Академии наук Республики Таджикистан, Республика Таджикистан;

*А. Х. Гильмулинов*, помощник Президента Республики Татарстан, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой лазерных технологий ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ», Российская Федерация;

*А. А. Рискулов*, д.т.н., профессор, декан факультета международных образовательных программ Ташкентского государственного транспортного университета, Республика Узбекистан;

*Ши-Ханг 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;

*Сунь Яньлэн*, д.т.н., профессор, вице-президент по иностранным делам Шэньянского аэрокосмического университета;

*Е. А. Шапорова*, к.х.н., доцент кафедры технической эксплуатации воздушных судов и двигателей БГАА, Республика Беларусь;

*А. В. Зырянов*, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой авиационных двигателей факультета авиационных двигателей, энергетики и транспорта Уфимского университета науки и технологий, Республика Башкортостан.

##### Юридические науки:

*Б. П. Елисеев*, д.ю.н., профессор, ректор МПГУ ГА, Российская Федерация;

*Б. А. Сафарзода*, д.ю.н., профессор, Чрезвычайный и Полномочный Посол Республики Таджикистан в Республике Беларусь, Республика Таджикистан;

*В. С. Каменков*, д.ю.н., профессор, профессор кафедры финансового права и правового регулирования хозяйственной деятельности юридического факультета БГУ, Республика Беларусь;

*З. Э. Халилов*, к.ю.н., доцент кафедры правоведения НАА, Республика Азербайджан;

##### Педагогические науки:

*Г. М. Булдык*, д.пед.н., профессор, профессор кафедры физических и математических основ информатики Белорусской государственной академии связи, Республика Беларусь;

*А. М. Волочко*, к.фил.н., д.пед.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории гуманитарного образования НИО, Республика Беларусь.

##### Психологические науки:

*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;

*З. В. Машарский*, к.псх.н., декан факультета гражданской авиации БГАА, Республика Беларусь;

*О. С. Машарская*, к.псх.н., заведующий кафедрой андрагогики факультета дополнительного профессионального образования института повышения квалификации и переподготовки БПТУ, Республика Беларусь.

## CONTENTS

### AVIATION IN PERSONS

Lilacs the Colour of War-Time Sky. Aviation Lilac Varieties . . . . . 2

### TECHNICAL SCIENCES

*L. Gretchikhin.* A Heat Pump Based on a Working Turbine . . . . . 8

*I. Abdullin, M. Vasviev, A. Shkalenko.* Unmanned Aerial Vehicles With Deployable Wings: Transformation of Civilian Technologies and New Opportunities . . . . . 14

*A. Kirilenko, V. Shurui.* Low Levels of Radiation in Aviation and the Environment . . . . . 20

*V. Golubev, N. Shevchik, D. Degterov, A. Asadchy, M. Malko, S. Vasilevich, S. Stoiko.* Microwave-Assisted Thermal Conversion Equipment for Organic Waste Generated in the Aviation Industry . . . . . 26

*P. Ivanishin, A. Sanko, M. Basov, E. Rusakovich, V. Potapov.* Analysis of the Influence of Instrumental Measurement Errors of Sensors of a Strapback Inertial Navigation System on the Accuracy of Guidance of a Highly Dynamic Object . . . . . 32

*A. Saladukha.* Trajectory-Based Air Traffic Control: Construction Problems and Solution Prospects . . . . . 38

*A. Sanko, V. Potapov.* Control of the Technical Condition of the Main Gearbox of a Helicopter by the Vibroacoustic Method . . 42

*A. Kirilenko, O. Filippenko.* Demonstration Experiment on Aeromechanics in the Course of Physics . . . . . 47

*O. Skrypnik, A. Matskevich.* Assessment of the Efficiency of Using a Decision Support System in Professional Training of Air Traffic Controllers . . . . . 53

*V. Kovalevich, A. Borovoy.* Control Analysis of the Accuracy of Distance Determination by the Kinematic Method . . . . . 61

### LEGAL SCIENCES

*O. Koloshich.* Flight Safety in International Air Law . . . . . 68

### PSYCHOLOGICAL SCIENCES

*Z. Masharsky, O. Masharskaya.* Psychophysiological Bases of Human Errors in Aviation Activities . . . . . 78

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  
bgaa.by

## Колонка главного редактора



**Яцкевич  
Игорь Георгиевич**

Ректор  
Белорусской  
государственной  
академии авиации

Тринадцатый выпуск выходит в период, насыщенный событиями, имеющими особое значение для гражданской авиации Республики Беларусь. Мы – люди науки и техники, поэтому для нас число 13 – это не знак возможных неприятностей, а порядковый номер, за которым стоит очередной этап плодотворной научной работы, направленной на решение проблем настоящего ради движения в будущее. Этап нашего роста вместе с ростом и прогрессом всей авиационной отрасли.

Под этим «несчастливым» номером сошлись знаковые события для БГАА: первый выпуск пилотов гражданской авиации в суверенной Беларуси, проведение X юбилейной Международной научно-практической конференции, посвященной пятилетке качества «Авиация: история, современность, перспективы развития».

В 2021 году БГАА впервые в истории нашей страны открыла свои двери для абитуриентов, которые мечтали стать пилотами гражданской авиации. Теперь, дойдя до выпуска, они воплотили мечты в реальность и стали авиационными специалистами, готовыми на практике доказать свое право быть первыми. Профессорско-преподавательский состав БГАА и работники организаций-партнеров показали высокий уровень профессионализма и в короткие сроки решили важнейшую задачу, поставленную Главой государства, – организовать подготовку курсантов по специальности «Летная эксплуатация воздушных судов гражданской авиации». Это наш общий вклад в обеспечение суверенитета и устойчивого развития Республики Беларусь.

Наши научные исследования устремлены в будущее, и таких площадок будет становиться больше. Мы продолжаем работать и творить, отражая наиболее актуальные результаты и достижения на страницах журнала «Авиационный вестник». Журнал помогает нам объединить усилия всех, кто заинтересован в развитии авиации. Желаю всем нашим авторам и читателям научных озарений и идей, плодотворного сотрудничества, крепкого здоровья и счастья в Новом 2026 году!

# СИРЕНЬ ЦВЕТА ВОЕННОГО НЕБА. АВИАЦИОННЫЕ СОРТА СИРЕНИ

*«И опять зацветает сирень 45-го года.  
И цветет, и цветет, и не может никак отцвести»*  
Ю. Левитанский

Я убеждена, что нам, молодежи, о войне надо говорить обязательно. Не назидательно и скучно, а взволнованно и гордо, с необычной подачей патриотического материала.

Когда уходят свидетели военных лет, очень важно, чтобы мы, их потомки, сохраняли благодарную память о героях: красноармейцах, партизанах, подпольщиках. В стенах Белорусской государственной академии авиации мы, в первую очередь, вспоминаем о подвигах летчиков во время Великой Отечественной войны, предложив взглянуть на военные события с необычного и одновременно всеми знакомого ракурса. А девизом этого станут слова: «Сохранить историю, чтобы не повторить прошлое!».

Особое значение, на наш взгляд, несут в себе символы — и прежде всего символы Великой Победы. Два несомнимых понятия — война и цветы. Но, объединившись однажды в памяти, они сумели стать прочной нитью, связавшей прошлое и настоящее. В этих цветах живет память о войне и Победе, о вчерашних мальчишках и девчонках, ушедших добровольцами на фронт, в партизаны, в комсомольское подполье. Очевидцы Великой Отечественной войны — наши ветераны — помнят, как в 1945-м посреди долгожданной тишины, освобожденной от гула самолетов и грохота снарядов, расцвела сирень. Герои ощущали пьянящий запах Победы. Он витал в небе и был повсюду, в каждом предмете, человеке, взгляде и слове. А душистый, цветочный и такой родной аромат сирени наполнял запах Победы торжеством. Теперь сирень — это символ весны, праздника, победы в Великой войне, победы над фашизмом, скорби за погибших и раненных и знак начала новой, спокойной жизни. 9 мая появилась добрая и светлая традиция — высаживать кусты сирени. Так современное поколение выражает признание, уважение и гордость за свой непоколебимый народ.

Так с чего же начинается Родина? С семьи, с поступков на благо себе и окружающим, с ответственности и равнодушия, словом, с тех ценностей, которые прививаются с самого рождения. Накануне 75-й годовщины Великой Победы, будучи еще учащейся 10 класса гимназии № 1 города Солигорска, я приняла участие в одной замечательной патриотической эстафете. Ее организовала моя бабушка, Екатерина Борисовна Вавилова, библиотекарь Солигорской районной центральной библиотеки, вместе со своими коллегами. Они предложили всем неравнодушным горожанам высадить в честь защитников нашей страны символ Победы — сирень. Но не простую, а «мемориальную», названную в честь героев Великой Отечественной войны.

Пусть наша сиреневая история, рассказанная простым и понятным способом, поможет молодежи узнать о героях-летчиках, чьи имена названы

не только улицы и теплоходы, но и скромная, очаровательная, знакомая нам всем с детства сирень.

Многие ли из нас, нынешнего молодого поколения, слышали о выдающемся советском селекционере сирени — фронтовике Леониде Алексеевиче Колесникове (18 мая 1893 — 28 января 1968), любившем сирень больше, чем жизнь?

Мечта Леонида Алексеевича была до невозможности проста: он хотел, чтобы в городах по всему миру были высажены прекрасные сорта как дань уважения героям. Так на Земле был бы создан «сиреневый рай». Колесников вывел более 300 сортов сирени, которые стали очень популярны в мире. На сегодняшний день известны лишь 60.

Сорт «Красавица Москвы» признана самой лучшей сиренью в мире. Этот сорт — один из самых тяжелых и долгих трудов Колесникова. Более 10 лет он работал, чтобы создать невероятной красоты куст, который будет своим ароматом наполнять улицы городов.

Международное общество сирени не могло оставить без внимания заслуги Леонида Алексеевича и его «Красавицу». В 1973 году его наградили «Золотой веткой сирени», посмертно. Почетную награду получили его родственники по почте. Еще до признания Международным обществом, в 1952 году Колесникова наградили Сталинской премией.

К сожалению сейчас, на родине Леонида Алексеевича, сирени не так много, как было раньше. В Москве можно увидеть редкие кусты на улицах, на территории Кремля и Всероссийского выставочного центра. В 1960-е годы Колесников вместе со школьниками высадил Сиреневый бульвар, но сейчас там осталось не так много сирени.

Селекция — это сложная и долгая работа, именно поэтому цифра в 300 выведенных им сортов впечатляет. Традиции и работа Колесникова сохранились по сих пор в лаборатории микроклонирования Главного Ботанического сада Российской академии наук и в лаборатории плодоводства Московской сельскохозяйственной академии имени К. А. Тимирязева. На основе новых технологий в этих лабораториях размножают и сохраняют лучшие сорта сирени. Леонид Алексеевич не имел профессионального образования, не писал научных трудов. Он делал работу, которая приносила ему радость, а своим лучшим творениям он давал громкие названия. 18 мая, в день рождения Колесникова, в России отмечается День сирени, а значит, его заслуги невозможно переоценить.

Фронтовик, заслуживший свои медали и ордена на трех войнах: Первой мировой, Гражданской и Великой Отечественной, прошедший горнило страшных боев, не мог не назвать лучшие сорта своей селекции в честь народных героев и символов победы:

«Валентина Гризодубова», «Алексей Маресьев», «Небо Москвы», «Зоя Космодемьянская», «Николай Гастелло», «Защитникам Москвы», «Маршал Жуков», «Маршал Василевский», «Великая Победа».

Каждый год я с нетерпением ждала мая, чтобы побывать на Неделе сирени в Центральном Ботаническом саду Национальной академии наук Беларуси (далее – НАН Беларуси). Здесь я увидела знаменитые «военные» сорта, узнала о международной акции «Сирень Победы», инициированной Центральным ботаническим садом НАН Беларуси и Главным ботаническим садом имени Цицина в Москве в 2010 году. «Сирень победы» – акция, которая объединяет растениеводство и патриотическое воспитание. Бабушка познакомила меня с известным белорусским селекционером, куратором сирингария – Натальей Викторовной Македонской, в ее сердце сирени принадлежит особое место.

В рамках проведения «сиреневой» акции мы с бабушкой и ее коллегами побывали в экспедиции в белорусской деревне Хоростово, на родине нашего земляка, Героя Советского Союза, легендарного партизанского командира Василия Захаровича Коржа. И здесь не обошлось без именной сирени. Большую поисковую работу проделали участники «сиреневой» акции для нахождения сорта в честь Василия Захаровича.

Записав рассказы очевидцев, мы рассказали солигорчанам историю «коржовой» сирени. Когда-то давным-давно привез Василий Захарович после войны из командировки необыкновенной красоты сирень. Прошло время... Теперь во многих палисадниках белорусского села каждую весну расцветает сирень, которую в народе так и стали называть «коржовой». Мы не только отыскали эту сирень, но и посадили перед памятником В. З. Коржу в Хоростово. А также привезли саженцы в Солигорск и в торжественной обстановке передали их в гимназию № 2.

Изучая историю жизни Леонида Колесникова, мое внимание привлекли так называемые «авиаторские» сорта сирени. Об истории названий сортов, мне бы и хотелось рассказать читателям.

#### «Небо Москвы»

1 июня 1941 года состоялась премьера фильма «Небо Москвы» режиссера Юлия Райзмана. Сюжет фильма повествует об Илье Стрельцове, который окончил летную школу и в сентябре 1941-го был назначен в истребительный авиапункт. В первом полете ему дают прозвище «Счастливчик». За основу фильма была взята одноименная пьеса Георгия Мдивани.



Сорт сирени «Небо Москвы»

«Небо Москвы» – это не только произведение искусства, но и прекрасный сорт сирени. Соцветия этого сорта – необычайно красивы. Их цвет невозможно описать одним словом, ведь каждый цветочек – это живая палитра, где переплетаются оттенки голубого, фиолетового и пурпурного. Именно это многообразие цветов, смешивающихся в неповторимых пропорциях, делает сирень «Небо Москвы» столь выразительной и заметной среди городской зелени.

#### «Алексей Маресьев»

О подвиге А. П. Маресьева была написана книга Б. Н. Полевого «Повесть о настоящем человеке». Алексей Петрович попал на фронт с самого начала войны. Он показывал отличный результат, качественно выполнял боевые задания. Но 5 апреля 1942 года боевой вылет закончился трагично для него. Самолет долетел до линии фронта, однако из-за серьезных поломок до авиабазы лететь уже не мог. Алексей Маресьев очень серьезно пострадал в том полете, его ноги пострадали больше всего. Казалось бы, что с такими травмами человека ждет верная смерть. Но Алексей Петрович доказал, что желание жить заставляет человека свершать сверхчеловеческие подвиги. Восемнадцать суток он пробыл в густом лесу, ползком преодолевая снежные заносы, достигавшие метра в высоту.



Алексей Маресьев

Измощенный, он добрался до деревни. Из-за тяжелых травм и адского пути не смог внятно объяснить кто он такой. Местные жители помогли ему не сразу, опасаясь, что он диверсант. В госпитале ему ампутировали обе ноги до колена. Это было лишь начало его борьбы... У него развилось заражение крови. В течение месяца он боролся за свою жизнь. Железная воля, невероятное упорство, долг Родине и желание жить помогли Алексею Маресьеву выжить и встать на ноги. Долгие и изнурительные тренировки в Республике Чувашия дали возможность Алексею Петровичу вернуться на фронт. Маресьев не только выжил в том бою, но и вновь сел за штурвал истребителя.



Сорт сирени «Алексей Марсеев»

«Алексей Марсеев» — это самый настоящий авиаторский сорт сирени, ведь его крупные лиловые лепестки закручены в виде пропеллеров, что придает этому сорту свой непревзойденный шарм.

*«Полина Осипенко»*

Полина Денисовна всегда отличалась бойкостью и нравом, присущим мальчишкам. Так, во время визита на Качинский аэродром, она твердо решила поступать в летное училище, крепко связав жизнь с авиацией. В 1933 году окончила его с отличием и стала служить в Бобруйской авиабригаде. Сразу служила просто летчицей, а потом стала командиром звена истребителей.



Полина Осипенко

Вскоре Полину Осипенко начали готовить вместе с женской командой к авиационным рекордам. В 1937 году она побил сразу три мировых рекорда. 22 мая на самолете МП-1 осилила высоту в 8864 метра, побив рекорд для женщин на самолетах с поршневыми двигателями. 25 мая побил второй мировой рекорд: самолет с грузом в 500 килограмм поднялся на высоту 7605 метров. Полина решила не останавливаться на достигнутом и в этот же день побил еще один мировой рекорд: самолет с грузом в одну тонну поднялся на высоту 7009 метров. 24 сентября 1938 года Полина Осипенко вместе с В. Гризодубовой и М. Расковой вылетели из Москвы на Дальний Восток. Летчицы установили мировой рекорд, про-



Сорт сирени «Полина Осипенко»

летев на 6450 километров за 26 часов 29 минут. В ноябре этого же года весь экипаж получил звания Герой Советского Союза.

«Полина Осипенко» — сорт сирени прелестных белых цветков. Особенность этого сорта — его трехрядность. Благодаря ей, белая сирень приобретает голубой, лиловый и розовый оттенок, так как каждый ряд имеет свой неповторимый цвет.

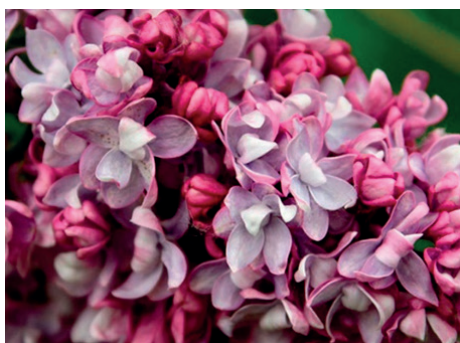
*«Валентина Гризодубова»*

Валентина Степановна Гризодубова — советская летчица, полковник, одна из первых женщин, удостоенных звания Герой Советского Союза. За два года после окончания летной школы, Валентина облетела всю страну вдоль и поперек. В 1937 году она побил пять мировых рекордов высоты, скорости и дальности полета на спортивных легкомоторных самолетах Яковлева. Во время Великой Отечественной войны 30-летняя женщина командовала целым гвардейским бомбардировочным полком. За всю войну Валентина совершила 200 боевых вылетов, 137 из них — в ночное время.



Валентина Гризодубова

Сорт сирени «Валентина Гризодубова» — это один из самых стойких и неприхотливых сортов. Соцветия имеют несколько ярких оттенков от сиреневых до розовых. Лепестки верхних рядов волнистые, что придает особенный объем сирени в букете.



Сорт сирени «Валентина Гризодубова»



Сорт сирени «Капитан Гастелло»

*«Николай Гастелло»*

Сорт сирени «Николай Гастелло» открывает в моей памяти очень важные воспоминания. Памятник Николаю Гастелло я посетила одним из первых в своей жизни. Поэтому история этого летчика так отпечаталась в моей памяти.



Николай Гастелло

Свое первое боевое крещение летчик Николай Гастелло получил в 1939 году в боях на Халхин-Голе. 24 мая 1941 года Гастелло стал командиром 4-й эскадрильи 207-го дальнебомбардировочного авиаполка. Первый свой боевой вылет Гастелло совершил 22 июня в 5 часов утра. 26 июня 1941 года, спустя всего четыре дня с момента начала войны, экипаж под командованием капитана Н. Ф. Гастелло в составе лейтенанта А. А. Бурденюка, лейтенанта Г. Н. Скоробога и старшего сержанта А. А. Калинина на самолете ДБ-3 вылетел на боевое задание. Летчикам было поручено сбросить бомбы на колонну немецкой техники по дороге Молодечно — Радосковичи. Боевая группа летела в составе звена из двух бомбардировщиков. Огнем зенитной артиллерии противника самолет был подбит. Весь экипаж имел возможность спастись путем катапультирования, но преданные делу парни приняли решение идти на таран. Горящий самолет, врезавшись в колонну вражеской техники, сорвал спецоперацию фашистов. В результате операции все члены экипажа герои-

чески погибли. Огненный таран команды капитана Николая Францевича Гастелло стал одним из самых известных в истории Великой Отечественной войны примеров подвига.

Сорт сирени «Капитан Гастелло» — это темно-лиловый, с нотками пурпура и синевы сорт. Его цветки винтообразно изогнуты. А эффектные соцветия привлекают взгляд своим обильным цветением.

Таким образом, всеми нами знакомый цветок стал мощным символом памяти, связывающей поколения. Благодаря самоотверженному труду селекционера Леонида Колесникова и энтузиазму простых людей память о подвигах летчиков, партизан и всех защитников нашей Родины продолжает жить в названиях сортов сирени. Такие акции, как «Сирень Победы», превращают ботанические сады и городские улицы в живые мемориалы. Эта «сиреневая» история позволяет нам помнить, чтить и передавать будущим поколениям светлую память о тех, кто ценой своей жизни отстоял свободу и мир.

*Триста лет живет сирень.  
Она не только символ Победы, но и живой памятник всем тем, кто защитил нашу Родину  
в Великой Отечественной войне.  
Светлая им Память...*

Материал подготовлен  
лаборантом сектора научных исследований  
авиационного научно-технического центра,  
курсантом группы М121  
Д. М. Кислюк



Учреждение образования  
«Белорусская государственная  
академия авиации»



Специальность  
05.22.14  
Эксплуатация  
воздушного транспорта

# Аспирантура Эксплуатация воздушного транспорта

Аспирантура академии авиации – это кузница научных кадров высшей квалификации: исследователей и преподавателей авиационной отрасли.

## Научная квалификация «Исследователь»

## Преимущества получения образования

Аспирантура является уровнем научно-ориентированного образования и направлена на подготовку специалистов, обладающих:

- ✓ навыками планирования;
- ✓ самостоятельностью проведения научных исследований;
- ✓ глубокими теоретическими знаниями.

- ✓ рост уровня образования;
- ✓ саморазвитие и личностное развитие;
- ✓ развитие критического мышления;
- ✓ расширение спектра возможностей для карьерного роста;
- ✓ возможность преподавать в учреждении высшего образования или работать в науке;
- ✓ возможности для исследований своих собственных теорий или работы над перспективными проектами;
- ✓ получение признания международного сообщества.

## Обучение в аспирантуре

- ✓ углубленное изучение общеобразовательных и специальных дисциплин;
- ✓ сдача установленных кандидатских экзаменов и зачетов (для обучающихся в форме соискательства);
- ✓ овладение методами и средствами научных исследований;
- ✓ выполнение научных исследований по актуальным темам;
- ✓ систематизация и обобщение полученных результатов.

## Период обучения

- ✓ в дневной форме – 3 года;
- ✓ в заочной форме – 4 года;
- ✓ в форме соискательства – 5 лет.

## Требования к кандидатам

- ✓ высшее образование;
- ✓ склонность к научным исследованиям, что подтверждается научными публикациями, участием в научно-исследовательских и инновационных проектах, конференциях или другими материалами;
- ✓ рекомендация ученого совета учреждения высшего образования или факультета этого учреждения (для поступающих в год окончания обучения в данном учреждении) либо опыт практической работы не менее 2 лет на должностях, требующих наличия высшего образования.

**Приглашаем будущих  
лидеров отрасли!**

220096, Республика Беларусь, г. Минск,  
ул. Уборевича, 77, кабинет 1105,  
тел.: +375 17 249-97-65



# ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ELC

# ТЕПЛОВОЙ НАСОС НА ОСНОВЕ РАБОТАЮЩЕЙ ТУРБИНЫ

## A HEAT PUMP BASED ON A WORKING TURBINE

**Гречихин Леонид Иванович** – 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 the Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus  
gretchihin@yandex.ru.

**Аннотация:** в настоящей работе представлен анализ газодинамики работы турбины, функционирующей в качестве теплового насоса, с использованием континуального и статистического подходов. Показано, что континуальное рассмотрение движения воздуха в межлопаточном канале позволяет получить исключительно качественные результаты. Основной акцент сделан на статистическом подходе, который применен для анализа работы турбины двигателя Д-30 II серии в режиме теплового насоса. Определены коэффициенты преобразования теплового насоса на основе турбины. На примере двигателя Д-30 II серии самолета Ту-134 продемонстрирована практическая возможность использования турбины в качестве теплового насоса. Установлены оптимальные условия функционирования турбин высокого и низкого давления.

**Ключевые слова:** турбина, тепловой насос, газодинамика, самолет, двигатель.

**Abstract:** this paper presents an analysis of the gas dynamics of a turbine operating as a heat pump using continuum and statistical approaches. It is shown that continuous consideration of the air movement in the interscapular canal allows obtaining exceptionally high-quality results. The main focus is on the statistical approach used to analyze the operation of the turbine of the D-30 II series engine in the heat pump mode. The conversion coefficients of a turbine-based heat pump are determined. Using the example of the D-30 II series engine of the Tu-134 aircraft, the practical possibility of using a turbine as a heat pump is demonstrated. Optimal operating conditions for high and low pressure turbines have been established.

**Keywords:** turbine, heat pump, gas dynamics, airplane, engine.

### Введение

Турбина представляет собой механизм, используемый для преобразования кинетической энергии потока газа или жидкости в полезную механическую энергию. Конструктивно турбина состоит из ряда лопаток, симметрично расположенных радиально вокруг центральной оси вращения, что демонстрируется на рисунке 1.

Лопатки турбины турбовентиляторных и турбореактивных двигателей играют ключевую роль в функционировании этих двигателей. Принцип действия турбины рассмотрим на примере двигателя Д-30 II серии, который использовался на самолете Ту-134 и был подвергнут стендовым испытаниям. Это позволит сопоставить результаты теоретического анализа с данными, полученными экспериментальным путем.

При крейсерском полете самолета Ту-134 топливный расход при номинальном режиме работы двигателей достигает 1432 кг/ч [1]. Полное сгорание этого объема топлива высвобождает энергию, эквивалентную 23200 л. с. Полученная мощность направляется на противодействие аэродинамическому сопротивлению, возникающему при движении самолета, а также на обеспечение вращения турбин как высокого, так и низкого давления.

Для компенсации сопротивления воздуха используются тяговые силы, создаваемые двигателями. Для самолета Ту-134, летящего на крейсерской скорости

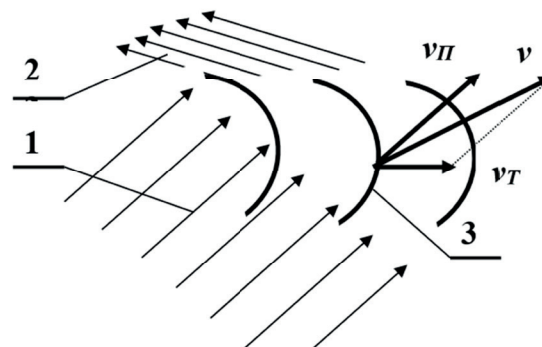


Рисунок 1 – Схематическое изображение работы турбины:  
1 – входящий поток; 2 – выходящий поток;  
3 – лопатки турбины

в 900 км/ч на высоте 9 км, каждый двигатель генерирует тягу в 1,6 т. Скорость истечения продуктов сгорания составляет приблизительно 600 м/с. Суммарная мощность, обеспечиваемая обоими двигателями, составляет 25240 л. с. На вращение турбин мощности не остается. Тем не менее, мощность, генерируемая турбиной высокого давления, достигает 34000 л. с., а турбина низкого давления выдает – 19500 л. с. Результирующая мощность, которую развивают турбины, равна 53500 л. с. [2]. Получается, что турбины функционируют подобно теплому насосу с доволь-

но эффективным коэффициентом трансформации ( $\eta \sim 3,5$ ).

Первая теория принципа функционирования турбины принадлежит Эйлеру. В этой теории рассматривалось континуальное обтекание несжимаемой средой. В результате получено, что импульс всех внешних сил за время действия  $\Delta t$  равен

$$\sum_i F_i \Delta t = (P_1 S_1 - P_2 S_2 - F') \Delta t, \quad (1)$$

где  $P_1 S_1$  — сила давления втекающего потока, Н;  
 $P_2 S_2$  — сила давления вытекающего потока, Н;  
 $F'$  — результирующая сила давления и трения, действующая на движущийся поток со стороны стенок канала, по которому движется среда в турбине, Н.

Тогда из общего определения второго закона Ньютона следует:

$$P_1 S_1 - P_2 S_2 - F' = \frac{dp}{dt} = \left( \frac{dm}{dt} \right)_1 v_1 - \left( \frac{dm}{dt} \right)_2 v_2, \quad (2)$$

где  $dm/dt$  — секундный расход движущейся среды,  $m^3/c$ ;  
 $v_1$  — скорость движения среды на входе канала,  $m/c$ ;  
 $v_2$  — скорость движения среды на выходе из канала при движении воздуха,  $m/c$ .

Представленный метод позволил качественно продемонстрировать жизнеспособность двигателя, основанного на принципе турбины, однако не раскрывает в полной мере механизм создания тяги в полете самолета за счет турбины. В связи с этим была сформулирована цель: установить, каким образом происходит передача энергии во внутреннюю систему энергоснабжения летательного аппарата. Для решения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- изучить динамические процессы взаимодействия воздушного потока и лопастей турбины при континуальном обтекании;
- исследовать динамику взаимодействия воздушного потока с лопастями турбины, используя методы статистической газовой динамики;
- установить факторы, влияющие на изменение внутренней энергии потока газа при его прохождении через пространство между лопастями;
- провести обоснование характера взаимодействия конструкции турбины с окружающей средой.

Последовательно рассмотрим поставленные задачи применительно к самолету Ту-134.

### 1. Динамика взаимодействия воздушного потока с лопатками турбины

Рассмотрим процесс взаимодействия воздушного потока с лопатками турбины и с турбиной в целом. Пусть среда (воздух) со скоростью  $v_n$  входит в межлопаточное пространство турбины по нормали к плоскости входа, как изображено на рисунке 2. Форму лопаток турбины представим в виде эллипсоида с осями  $a$  и  $b$ :

$$y = b \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}. \quad (3)$$

На основании рисунка 2 имеем:

$$\operatorname{tg} \gamma = y' = \frac{bx}{a^2 \sqrt{1 - x^2/a^2}}. \quad (4)$$

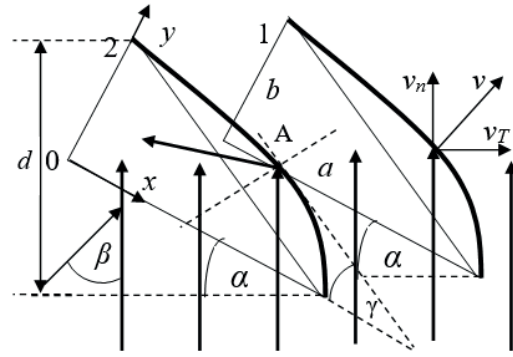


Рисунок 2 — Взаимодействие набегающего потока воздуха на лопатки турбины

В точке  $A$  на удалении  $x$  по оси  $a$  радиус кривизны лопатки находится по формуле

$$R = \sqrt{a^4 / b^2 - (a^2 / b^2 - 1)x^2}. \quad (5)$$

Длина лопаток турбины вдоль радиуса вращения определяется следующим образом:

$$d = a \sin \alpha + b \cos \alpha. \quad (6)$$

Рассмотрим случай, когда лопатки турбины установлены под углом  $\alpha$  приблизительно равным  $20^\circ$ , высотой  $0,1$  м, расстояние между лопатками составляет  $2$  см, расстояние от оси вращения —  $0,3$  м. Компрессор сжимает газ перед турбиной в  $4$  раза. Тогда давление на выходе составит  $4,052 \cdot 10^5$  Па. Положим, что сечение межлопаточного пространства не изменяется по всей длине. Если турбина вращается с частотой  $1200$  об/мин, то на ее выходе скорость потока воздуха составит

$$v = \sqrt{v_n^2 + v_T^2}, \quad (7)$$

где  $v_T$  — радиальная скорость турбины,  $m/c$ .

При скорости на входе турбины  $v_n = 20$   $m/c$  результирующая скорость на выходе из турбины на основании (1) составит приблизительно  $42,7$   $m/c$ . Увеличение кинетической энергии потока воздуха происходит вследствие изменения внутренней энергии воздуха. Это значит, что

$$\frac{mv^2}{2} - \frac{mv_n^2}{2} = \frac{m}{\mu} C_V \Delta T = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R \Delta T, \quad (8)$$

где  $\mu$  — молярный вес воздуха,  $kg/mol$ ;

$\Delta T$  — изменение температуры воздуха на выходе из турбины,  $K$ ;

$i$  — число степеней свободы, которое для воздуха можно положить равным  $5$ ;

$R$  — универсальная газовая постоянная,  $Dж/(моль \cdot K)$ .

Из равенства (8) получаем  $\Delta T \sim 1$   $K$ .

Когда в системе присутствует такая разница температур, происходит конвективный теплообмен между всей конструкцией турбины и окружающей средой, что приводит к функционированию стандартного теплового насоса. Молекулы окружающей среды, взаимодействуя с внешней оболочкой турбины, соприкасаются с поверхностными группами атомов,

передавая посредством упругого столкновения часть своей энергии, равной

$$\theta = \frac{4mM_{\text{кл}}}{(m + M_{\text{кл}})^2}, \quad (9)$$

где  $m$  – средняя масса молекул воздуха, кг;

$M_{\text{кл}}$  – масса кластера материала поверхности, кг [3].

Так для трехатомных молекул алюминия при температуре  $29\text{ К}$   $M_{\text{кл}} = 14,31 \cdot 26,98 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} = 6,41 \cdot 10^{-25}$  кг и  $\theta = 0,26$ . Следовательно, молекулы воздуха в единицу времени переносят на площадь всей конструкции  $S_{\text{к}} = \pi r^2 = 0,283 \text{ м}^2$  следующее количество энергии

$$\dot{Q} = \theta \frac{1}{6} n \bar{v} c_{\text{v}} S_{\text{к}} \Delta T, \quad (10)$$

где  $n$  – концентрация молекул воздуха на высоте полета самолета;

$\bar{v} = \sqrt{\frac{8k_{\text{Б}}T}{\pi m}}$  – среднехаотическая скорость молекул воздуха, м/с;

$c_{\text{v}} = ik_{\text{Б}}/2$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К).

При столкновении молекул воздуха с дюралевой поверхностью  $\dot{Q} = 4,25$  кВт. Если учесть, что после компрессора на его лопатках происходит уменьшение температуры воздуха, то результирующее  $\Delta T = 5,5$  К, и тогда  $\dot{Q} = 23,4$  кВт.

Применение уравнения Эйлера (2), как показано на рисунке 2, указывает на то, что воздушный поток способен генерировать на валу турбины мощность 24,7 кВт. Учитывая, что турбина преобразует тепловую энергию в механическую работу, значение мощности, вычисленное с использованием уравнения Эйлера, примерно совпадает с результатами, полученными при расчете конвективного теплообмена. Противоречия нет, и это позволяет предположить, что при изучении функционирования турбины можно пренебречь детальным анализом размеров и формы лопаток. В этом случае рассматривается интегральное действие, которое игнорирует специфику взаимодействия воздушного потока в пределах межлопаточного пространства. Следовательно, такой упрощенный метод непригоден для осуществления компьютерного моделирования работы турбины. Для более точного анализа производительности турбины в роли теплового насоса рекомендуется использовать методы статистической газовой динамики, которые описаны в работах [4, 5].

## 2. Применение статистической газодинамики для анализа работы турбины

Рассмотрим работу турбины. На участке входа в турбину газ характеризуется наличием внутренней энергии, а также кинетической энергией, обусловленной его перемещением. Результирующая энергия равна

$$E_1 = \frac{m}{\mu} RT_1 + \rho \frac{v_1^2}{2} V, \quad (11)$$

где  $m$  – масса газа, которая участвовала в процессе взаимодействия, кг;

$T_1$  – температура газа на входе турбины, К;

$\rho$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;

$v_1$  – скорость движения газа на входе турбины, м/с;

$V$  – общий объем газа, который проходит за время взаимодействия, м<sup>3</sup>.

В результате воздействия газового потока на лопатки турбины, часть энергии преобразуется для преодоления фрикционных сил и изменения параметров движения, а именно скорости (как величины, так и направления). Если учитывать, что поток является ламинарным, и рассматривать упругие столкновения отдельных атомов с поверхностью лопаток турбины в условиях термодинамического баланса, то можно утверждать, что энергетическое состояние газа претерпит изменения и будет выражаться следующим образом:

$$E_2 = \frac{m}{\mu} RT_2 + \rho \frac{v_2^2}{2} V + \frac{J\omega^2}{2} + A_{\text{тр}} + E_{\text{взаим}}, \quad (12)$$

где первый член ряда – внутренняя энергия газа, второй член – кинетическая энергия поступательного движения газа, третий член – вращательная энергия газа (энергия вихря), четвертый член – энергия, затраченная на преодоление диссипативных сил трения, и, наконец, последний член, который ранее не учитывался, является энергией, затраченной на процесс взаимодействия с окружающей средой как открытой системой.

Изменение энергии пошло на совершение работы, а именно

$$E_2 - E_1 = \Delta A. \quad (13)$$

Отсюда с учетом (12) и (13) получаем

$$\Delta A = \frac{J\omega^2}{2} + A_{\text{тр}} + E_{\text{взаим}} + \frac{\rho V}{2} (v_2^2 - v_1^2) + \frac{m}{\mu} R(T_2 - T_1). \quad (14)$$

В случае ламинарного потока, обтекающего поверхность лопасти турбины, формирование вихревых структур не происходит. Поэтому  $\omega = 0$ . Если положить, что в процессе взаимодействия молекул воздуха с поверхностью лопатки турбины реализуется упругое столкновение, то  $v_2 = v_1$ . Изменение температуры воздуха, проходящего через пространство между лопатками, обусловлено адиабатным процессом сжатия или, наоборот, расширения. Так как изменение сечения в межлопаточном пространстве незначительное, то последним членом в (14) также можно пренебречь. Конструкция лопатки турбины разрабатывалась с целью сведения к минимуму сопротивления встречному потоку. Поэтому  $A_{\text{тр}} \approx 0$ . В этих предположениях реализуется следующее равенство:

$$\Delta A = E_{\text{взаим}}. \quad (15)$$

При столкновении молекул воздуха с лопастью турбины, их абсолютная скорость не претерпевает изменений, в то время как направление их движения меняется. В общем случае, когда поток входит в межлопаточный канал под углом  $\beta$ , лопатка установлена под углом  $\alpha$  с углом наклона поверхности лопатки турбины  $\gamma$ , для результирующей скорости встречи потока и для угла встречи с поверхностью отдельного элемента лопатки получаем следующие формулы:

$$v = \sqrt{v_{\Pi}^2 + v_{\Gamma}^2 + 2v_{\Pi}v_{\Gamma} \sin \beta},$$

$$\psi = 2\beta - \alpha - \gamma + \arctg \left( \frac{v_{\Pi} \cos \beta}{v_{\Gamma} + v_{\Pi} \sin \beta} \right). \quad (16)$$

Изменение скорости движения потока воздуха внутри межлопаточного канала по нормали и вдоль поверхности равны соответственно

$$\Delta v_n = v \cos \psi, \Delta v_\tau = v \sin \psi. \quad (17)$$

На изменение скорости движения по направлению тратится энергия, которая черпается из внутренней энергии потока воздуха.

Следовательно,

$$E_{\text{взаим}} = \frac{M(\Delta v_\tau)^2}{2} + \frac{M(\Delta v_n)^2}{2} - \frac{Mv_n^2}{2} = \frac{M}{\mu} \frac{i}{2} R \Delta T. \quad (18)$$

Отсюда изменение температуры потока после взаимодействия с элементом лопатки турбины равно

$$\Delta T = \frac{[(\Delta v_\tau)^2 + (\Delta v_n)^2 - v_n^2] \mu}{iR} = \frac{(v^2 - v_n^2) \mu}{iR}. \quad (19)$$

Для рассмотренных выше параметров турбины  $\Delta T = 1$  К, а в соответствии с (10) мощность конвективного теплообмена на всю поверхность турбины составит приблизительно 4,25 кВт.

Вращающиеся лопатки турбины с изогнутой геометрией формируют центробежное ускорение. Как следствие, воздушный поток оказывается под воздействием центробежного поля. В этом поле распределение воздушных частиц подчиняется закону Больцмана и может быть описано с помощью барометрической формулы следующего вида:

$$n(h) = n_0 \exp\left(-\frac{Mah}{k_B T}\right), \quad (20)$$

где  $M$  – усредненная масса молекул воздуха, кг;  
 $a = (\Delta v_\tau)^2 / r$  – центробежное ускорение, м/с<sup>2</sup>;  
 $r$  – радиус кривизны лопатки турбины, м.

Распределение общего числа частиц по высоте  $h$  запишется следующим образом:

$$dN = n_0 \exp\left(-\frac{Mah}{k_B T}\right) \Delta S dh. \quad (21)$$

Общее число частиц определится путем интегрирования равенства (21). В результате получим:

$$N = n_0 \frac{k_B T r \Delta S}{M(\Delta v_\tau)^2} \left[1 - \exp\left(-\frac{Mah}{k_B T}\right)\right]. \quad (22)$$

Общее число частиц в момент входа в межлопаточный канал равно

$$N = \frac{\rho v_n^2}{2} \Delta S H, \quad (23)$$

где  $H$  – расстояние между лопатками, м.

### 3. Изменения внутренней энергии газового потока в межлопаточном пространстве турбины

Приравнивая мощности, определяемые по (22) и (23), находим концентрацию частиц на внутренней поверхности лопатки турбины. Затем, умножая на произведение  $k_B T$ , получим величину давления непосредственно у внутренней поверхности и соответственно на внешней поверхности, т. е.

$$\Delta P = \frac{\rho v_n^2 M (\Delta v_\tau)^2 H}{2 k_B T r} \left[ \exp\left(\frac{M (\Delta v_\tau)^2 H}{r k_B T}\right) - 1 \right]. \quad (24)$$

В соответствии с рисунком 2 и формулой (24) сила давления на отдельный элемент лопатки турбины определится следующим образом:

$$\Delta F_1 = \Delta P \Delta S \sin(\alpha + \gamma), \quad (25)$$

а момент силы и мощность на валу равны соответственно:

$$\Delta M_1 = \Delta F_1 L, \Delta N_1 = \Delta M_1 2\pi n, \quad (26)$$

где  $L$  – расстояние элемента лопатки турбины до оси вращения, м;

$n$  – частота вращения турбины.

Сила воздействия, возникающая при изменении нормальной составляющей скорости потока относительно поверхности лопатки, эквивалентна ударной силе. Согласно второму закону Ньютона, эта сила определяется как:

$$\Delta F_2 = \frac{dm}{dt} \Delta v_n = 2\rho h v_n v \cos \beta \cos \psi \Delta x. \quad (27)$$

Величина этой силы к радиусу вращения турбины, умноженная на расстояние элемента лопатки до оси вращения, даст момент силы и соответственно мощность на валу:

$$\Delta M_2 = \Delta F_2 \sin(\alpha + \gamma) L, \Delta N_2 = \Delta M_2 2\pi n. \quad (28)$$

Вращательное движение создает центробежные силы, которые оказывают влияние не только на профиль давления между лопастями, но и на сами лопатки турбины. Сила давления на элемент лопатки вдоль нормали составит

$$\Delta F_3 = \frac{dm}{dt} \Delta t \frac{(\Delta v_\tau)^2}{r} = \rho h v_n v \frac{\cos \beta \sin \psi}{R} \Delta x^2. \quad (29)$$

Время взаимодействия  $\Delta t = \Delta x / \Delta v_\tau$ . Тогда момент силы и развиваемая мощность на валу будут равны:

$$\Delta M_3 = \Delta F_3 \sin(\alpha + \gamma) L, \Delta N_3 = \Delta M_3 2\pi n. \quad (30)$$

При входе воздуха в межлопаточное пространство последующая лопатка 2 (см. рисунок 2) изменяет скорость потока вследствие своего вращения в соответствии с законом косинуса. В результате воздух приобретает дополнительную скорость и изменяется угол встречи воздушного потока с поверхностью лопатки 1 (см. рисунок 2). Удар лопатки 2 о поток воздуха, входящего в межлопаточное пространство, приводит к замедлению скорости вращения турбины. Сила замедления скорости вращения турбины, момента силы и мощности торможения при взаимодействии потока воздуха с элементом лопатки соответственно равны:

$$\Delta F_4 = \rho h v_n (v_\tau - v_n \sin \beta) \cos \beta \Delta x, \quad (31)$$

$$\Delta M_4 = \Delta F_4 L, \Delta N_4 = 2\pi n \Delta M_4.$$

Поток воздуха после взаимодействия с лопаткой 2 встретится с лопаткой 1 вдоль радиуса вращения:

$$z = D \sin \psi = x \sin \alpha + y \cos \alpha, \quad (32)$$

где  $D$  – расстояние между лопатками, м.

Отраженный поток с внутренней поверхностью лопатки 2 встретится на высоте

$$z' = 2D\sin\psi = x'\sin\alpha + y'\cos\alpha, \quad (33)$$

Угол встречи с внутренней поверхностью лопатки 2 составит

$$\psi' = 2\beta - \alpha - \gamma' + \arctg\left(\frac{v_n \cos\beta}{v_r + v_n \sin\beta}\right). \quad (34)$$

Вследствие этого на лопатку 2 будет действовать тормозящая сила и тормозящий момент силы:

$$\begin{aligned} \Delta F_5 &= \rho h v_n (2v \cos\psi' + v_r) \cos\beta \Delta x, \\ \Delta M_5 &= \Delta F_5 L \sin(\alpha + \gamma), \\ \Delta N_5 &= \Delta M_5 2\pi n. \end{aligned} \quad (35)$$

Тангенциальная составляющая создает дополнительное центробежное ускорение и способствует увеличению силы, действующей на элемент лопатки, и момента силы на валу турбины, которые соответственно равны

$$\begin{aligned} \Delta F_6 &= \rho h v_n v \frac{\cos\beta \sin\psi'}{R'} \Delta x^2, \\ \Delta M_6 &= \Delta F_6 L \sin(\alpha + \gamma), \\ \Delta N_6 &= \Delta M_6 2\pi n. \end{aligned} \quad (36)$$

Начальные координаты точки встречи с лопаткой 1 определяются методом последовательных приближений уравнения (32), а координаты точки встречи с тыльной стороной лопатки 2 — из уравнения (33). По этим данным определяются соответственно угол встречи и радиус кривизны, а также результирующая мощность на валу турбины:

$$N = K \sum_i \Delta h_i \int (dN_1 + dN_2 + dN_3 - dN_4 - dN_5 + dN_6), \quad (37)$$

где  $K$  — количество лопаток в турбине;

$\Delta h_i$  — элемент разбиения лопатки турбины по высоте.

Число лопастей устанавливается исходя из требования, чтобы толщина ламинарного пограничного слоя была намного меньше, чем расстояние между соседними лопастями. При этом лопасти должны целиком перехватывать набегающий воздушный поток. Зачастую выбор количества лопастей диктуется конструктивными ограничениями, свойственными конкретной конструкции турбины.

В турбину поступает воздух со скоростью  $v_n$ . Мощность такого потока равна

$$N_{nom} = \frac{dm}{dt} v_n^2 = \frac{\pi}{2} \rho (r_2^2 - r_1^2) v_n^3. \quad (38)$$

Отношение вида  $\eta = \frac{N}{N_{nom}}$  является энергетическим коэффициентом преобразования.

#### 4. Коэффициент преобразования внутренней энергии газового потока при его протекании в межлопаточном пространстве

Результаты, полученные в рамках статистической газодинамики, приведены на рисунке 3 при следую-

щих исходных данных: скорость потока воздуха — 20 м/с, угловая скорость вращения турбины — 20 об/с, расстояние между лопатками 2 см и расстояние от начала лопаток до оси вращения — 0,3 м.

Максимальная мощность, развиваемая турбиной, в зависимости от размеров лопаток приведена на рисунке 3, а при угле установки лопастей турбины 20° и угле входа потока воздуха в канал между лопастями 25°. Наибольшее значение максимальной мощности турбины возникает между лопастями, когда размер их лопаток для большой полуоси эллипса составляет 5 см, а малая полуось эллипса равна 1,5 см. Коэффициент преобразования при этом равен 3,5. При любых размерах турбинных лопаток, когда достигается максимальная мощность на валу, коэффициент преобразования энергии воздушного потока в механическую энергию вращения всегда больше единицы. Это свидетельствует о том, что турбина функционирует как тепловой насос, напрямую конвертируя тепловую энергию в механическое движение. Однако, по мере увеличения размеров лопаток, выходная мощность турбины на валу снижается.

Характерная работа турбины состоит в следующем: при заданном установочном угле 20° и при углах входа воздуха в межлопаточный канал менее 25° турбина стопорится и начинает вращаться в обратную сторону. При углах входа более 25° турбина работает нормально, но с ростом угла входа мощность на валу турбины резко падает (рисунок 3, б).

При неизменном угле атаки производительность турбины растет прямо пропорционально при небольших углах установки до 20°. После этого значения происходит резкое снижение эффективности, вплоть до обратного вращения.

Когда большая полуось выдерживается постоянной, а изменяется величина малой полуоси эллипса, то до 20° мощность турбины растет до значения, соответствующего максимальной мощности при заданных углах, а затем резко тормозится потоком воздуха, действующего с обратной стороны лопатки.

Для сопоставления теоретических расчетов с экспериментальными данными был проведен анализ турбины высокого давления двигателя D-30 II серии. В двигателе используются две турбины: высокого и низкого давления.

Турбина высокого давления состоит из двух дисков. Первый диск содержит 88 лопаток, размер которых по хорде, обращенной к потоку, равен 3 см (большая полуось эллипса), а малая полуось — 2,2 см.

Размер входного межлопаточного канала составляет примерно 2 см, а установочный угол — около 45°. Сопловой аппарат направляет поток воздуха в межлопаточный канал под углом в среднем 51°. Скорость потока на выходе из сопла Лавала достигает приблизительно 190 м/с, а скорость вращения турбины составляет 196 об/с. Средняя высота лопаток — 8 см.

Согласно расчетам, мощность, реализуемая на оси одного диска турбины высокого давления, составляет 6430 кВт.

На самолете Ту-134 установлены два двигателя D-30 II серии. Суммарная мощность, потребляемая турбинами высокого давления, составляет 34000 л. с. [1]. Теоретический расчет, выполненный в достаточно грубом приближении, дает значение 34650 л. с.

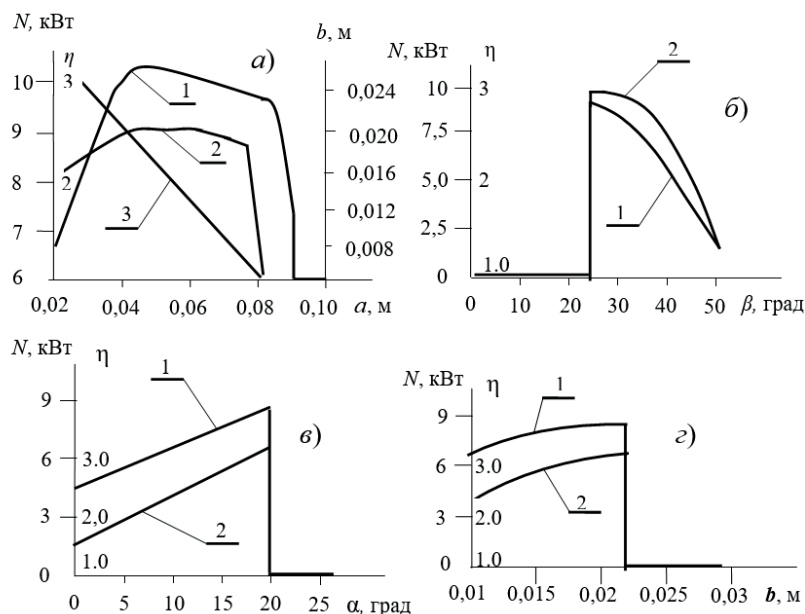


Рисунок 3 – Зависимость мощности турбины (1) и коэффициента преобразования (2) от различных изменяемых параметров:  
 а – максимальная мощность от размеров лопатки (3 – размер малой полуоси эллипса) при  $\alpha = 20^\circ$ ,  $\beta = 25^\circ$ ;  
 б – угол атаки потока воздуха при  $a = 0,03$  м,  $b = 0,022$  м,  $\alpha = 20^\circ$ ;  
 в – угол поворота большой оси эллипса при  $a = 0,03$  м,  $b = 0,022$  м,  $\beta = 25^\circ$ ;  
 г – малая ось эллипса при  $a = 0,03$  м,  $\alpha = 20^\circ$ ,  $\beta = 25^\circ$

В результате получаем практически полное совпадение теоретических расчетов с экспериментальными данными, полученными при стендовых испытаниях.

### Заклучение

Основываясь на предложенной концепции функционирования турбины в роли теплового насоса, установлено следующее:

1. Использование методов статистической газовой динамики дало возможность предоставить полное объяснение принципам взаимодействия воздушной струи и лопастей турбины.
2. Установлены точные изменения, происходящие во время влияния воздушного потока на лопатки турбины.

3. Определены факторы, влияющие на изменения внутренней энергии газового потока между лопатками турбины.

4. Полностью обоснован характер взаимодействия работающей турбины с окружающей средой.

5. Рассчитаны коэффициенты преобразования для турбины, функционирующей как тепловой насос.

6. Использование турбины в качестве теплового насоса демонстрирует перспективные направления для развития данной области техники.

7. Для улучшения коэффициента преобразования турбины, используемой в качестве теплового насоса, требуется значительная модификация конструкции турбины, особенно геометрии лопаток, с целью оптимизации влияния срывного потока.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лигум, Т. И. Аэродинамика самолета ТУ-134А / Т. И. Лигум. – М.: Транспорт, 1975. – 320 с.
2. Крюков, А. М. Конструкция и летная эксплуатация двигателя D-30 2 сер. / А. М. Крюков. – М.: Воздушный транспорт, 1975. – 198 с.
3. Плешивцев, Н. В. Физика воздействия ионных пучков на материалы / Н. В. Плешивцев, А. И. Бажин. – М.: Вузовская книга, 1998. – 392 с.
4. Лапцевич, А. А. Энергетическая база беспилотных летательных аппаратов. / А. А. Лапцевич, Л. И. Гречихин, Н. Г. Куць // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2011. – № 3. – С. 64–78.
5. Гречихин, Л. И. Статистическая аэродинамика / Л. И. Гречихин // AVIA-2009: матеріали ІХ Міжнародної науково-технічної конференції. – Київ: НАУ, 2009. – Т. 1. – С. 4.9–4.14.

### REFERENCES

1. Ligum T. I. Aerodynamics of the TU-134A Aircraft. Moscow, Transport, 1975, 320 p.
2. Kryukov A. M. Design and Flight Operation of the D-30 Series 2 Engine. Moscow, Air Transport, 1975, 198 p.
3. Pleshivtsev N. V., Bazhin A. I. Physics of Ion Beam Effects on Materials. Moscow, University Book, 1998, 392 p.
4. Laptevich A. A., Grechikhin L. I., Kuts N. G. Energy Base of Unmanned Aerial Vehicles. // Energetics. Proceedings of Higher Educational Institutions and Energy Associations of the CIS. 2011, № 3, pp. 64-78.
5. Grechikhin L. I. Statistical Aerodynamics // Proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference "AVIA-2009". Vol. 1. Kyiv, NAU, 2009. pp. 4.9-4.14.

Статья поступила в редакцию  
03.07.2025

# БЕСПИЛОТНЫЕ ВОЗДУШНЫЕ СУДА С РАСКРЫВАЮЩИМИСЯ КРЫЛЬЯМИ: ТРАНСФОРМАЦИЯ ГРАЖДАНСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ И НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

## UNMANNED AERIAL VEHICLES WITH DEPLOYABLE WINGS: TRANSFORMATION OF CIVILIAN TECHNOLOGIES AND NEW OPPORTUNITIES

**Абдуллин Ильфир Наильевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов Казанского национального исследовательского технического университета им. А. Н. Туполева (КНИТУ-КАИ), Российская Федерация  
ilfir528@mail.ru

**Ilfir Abdullin** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Aircraft Design and Engineering, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev (KNRTU-KAI), Russian Federation  
ilfir528@mail.ru

**Васвиев Марсель Маратович** – инженер-конструктор Казанского авиационного завода им. С. П. Горбунова, Российская Федерация  
2022.1216.03.00@mail.ru

**Marsel Vasviev** – Design Engineer at Kazan Aviation Plant named after S. P. Gorbunov, Russian Federation  
2022.1216.03.00@mail.ru

**Шкаленко Алина Игоревна** – инженер-конструктор компании «Тулпар интерьеры инжиниринг дизайн», Российская Федерация  
Shkalenko-alina@mail.ru

**Alina Shkalenko** – Design Engineer at Tulpar Interiors Engineering Design Company, Russian Federation  
Shkalenko-alina@mail.ru

**Аннотация:** современные беспилотные воздушные суда с раскрывающимися крыльями представляют технологический прорыв, устраняющий ключевые ограничения традиционных беспилотных летательных аппаратов – зависимость от стартовых площадок и низкую энергоэффективность. В исследовании проанализированы конструктивные решения, включая применение композитных материалов для снижения массы и гибридных энергосистем для повышения автономности. Экспериментальные испытания подтвердили, что механизмы раскрытия крыльев обеспечивают компактность (габариты в сложенном состоянии – 40×20×15 см) и устойчивость к экстремальным условиям. Практическое применение в логистике, сельском хозяйстве и мониторинге инфраструктуры продемонстрировало значительную экономическую эффективность. Например, инспекция нефтепроводов с использованием дронов сократила затраты на 92 тысячи рублей на 100 км по сравнению с вертолетными облетами, а точное внесение удобрений повысило урожайность культур на 15–20 %. Технология также снизила экологическую нагрузку. Социально-экономические эффекты включают оптимизацию логистики в труднодоступных регионах и создание новых высокотехнологичных рабочих мест. Перспективы развития связаны с интеграцией искусственного интеллекта для анализа данных в реальном времени и совершенствованием нормативной базы в рамках стратегии цифровой экономики. Результаты исследования актуальны для проектирования гражданских беспилотных летательных аппаратов, образовательных программ и решения задач в условиях урбанизированной среды и экстремального климата.

**Ключевые слова:** раскрывающиеся крылья, гражданские беспилотные воздушные суда, композитные материалы, гибридные системы.

**Abstract:** unmanned aerial vehicles with deployable wings offer a technological breakthrough, addressing key limitations of traditional drones, such as reliance on launch platforms and low energy efficiency. The study analyzes design solutions, including composite materials to reduce weight and hybrid energy systems to enhance autonomy. Experimental tests confirmed that wing deployment mechanisms ensure compactness (folded dimensions: 40×20×15 cm) and resilience to extreme conditions. Practical applications in logistics, agriculture, and infrastructure monitoring demonstrated significant economic benefits. For instance, pipeline inspections using drones reduced costs by 92,000 RUB per 100 km compared to helicopter surveys, while precision fertilizer application increased crop yields by 15–20 %. The technology also minimized environmental impact. Socio-economic effects include optimized logistics in remote areas and the creation of high-tech jobs. Future prospects focus on integrating artificial intelligence for real-time data analysis and improving regulatory frameworks under the digital economy strategy. The research findings are relevant for civil unmanned aerial vehicle design, educational initiatives, and addressing challenges in urban environments and extreme climates. By combining mobility, sustainability, and cost-effectiveness, deployable-wing drones have the potential to transform industries reliant on adaptive and scalable aerial solutions.

**Keywords:** deployable wings, civilian unmanned aerial vehicles, composite materials, hybrid systems.

## Введение

В исследовании по авиационной технике и гражданским беспилотным системам [1] основное внимание уделяется повышению мобильности, энергоэффективности и адаптивности летательных аппаратов. Ключевыми характеристиками современных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) являются их конструктивная компактность, устойчивость к экстремальным условиям и способность выполнять задачи в ограниченных пространствах. В работе рассмотрены принципы проектирования складных крыльев [2] с использованием композитных материалов, однако вопросы оптимизации аэродинамических профилей и гибридных энергосистем остаются недостаточно изученными.

В отличие от исследования [3], где акцент сделан на классических квадрокоптерах, в данной статье анализируются дроны с раскрывающимися крыльями, сочетающие преимущества фиксированных крыльев и компактность складных механизмов. Это позволяет устранить пробел в литературе, связанный с зависимостью БПЛА от специализированных стартовых площадок и ограниченной автономностью в условиях сложного ландшафта. Особое внимание уделяется технологиям, обеспечивающим запуск в урбанистической среде и горной местности, где традиционные методы мониторинга и доставки недоступны.

Цель работы заключается в анализе конструктивных решений для БПЛА с раскрывающимися крыльями, направленных на повышение их энергоэффективности, надежности и интеграции в национальную инфраструктуру. Обоснование цели реализуется через последовательное рассмотрение:

- 1) кинематики и динамики механизмов раскрытия крыльев;
- 2) применения композитных материалов для снижения массы конструкции;
- 3) гибридных энергосистем на основе солнечных панелей и литий-ионных аккумуляторов;
- 4) адаптивных аэродинамических профилей для полетов в турбулентных условиях;
- 5) практических применений в логистике, сельском хозяйстве и мониторинге инфраструктуры;
- 6) социально-экономического эффекта от внедрения технологии.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью снижения затрат на логистику в труднодоступных регионах, повышения точности мониторинга и создания новых стандартов для интеграции БПЛА в транспортные системы. Результаты работы могут быть применены в проектировании гражданских БПЛА, а также адаптированы для образовательных программ технических вузов, что соответствует стратегиям развития цифровой экономики [4].

### I. Конструктивные особенности и технологические преимущества дронов с раскрывающимися крыльями

Современные технологии стремительно меняют подходы к решению задач в гражданском секторе, и дроны с раскрывающимися крыльями занимают в этом процессе особое место. Их способность сочетать мобильность, энергоэффективность и адаптивность делает их незаменимыми для регионов с экстремаль-

ными условиями, где традиционные методы доставки и мониторинга недоступны.

Основное преимущество таких дронов — сочетание компактности с аэродинамической эффективностью. В сложенном состоянии их размеры редко превышают  $40 \times 20 \times 15$  см, что упрощает транспортировку в рюкзаке или специальном кейсе.

Для обеспечения сохранности аппарата при транспортировке и оперативного запуска в полевых условиях разработан специализированный транспортно-пусковой футляр (ТПФ) из ударопрочного поликарбоната, армированного углеволокном. Являясь компактной системой хранения и запуска для полевых условий, футляр массой 2 кг имеет внутренние ложементы, точно повторяющие контуры сложенного БПЛА, что исключает смещение компонентов при вибрациях (рисунок 1).



Рисунок 1 — БПЛА в транспортном кейсе

Герметичные уплотнения класса IP67 защищают электронику от влаги, пыли и экстремальных температур (рабочий диапазон: от  $-40$  °C до  $+60$  °C). Встроенная система терморегуляции с элементами Пельтье поддерживает температуру аккумуляторов в пределах от  $0$  °C до  $+25$  °C, предотвращая потерю емкости [5]. Дополнительные отсеки вмещают до трех сменных батарей, мультиспектральную камеру и комплект для экстренного ремонта. На крышке футляра интегрирован 5-дюймовый сенсорный дисплей с программным обеспечением для предпусковой диагностики и контроля заряда. Конструкция прошла испытания по стандарту MIL-STD-810G, подтвердив устойчивость к падению с высоты 1,5 м на бетонную поверхность. Габариты футляра ( $55 \times 30 \times 25$  см) позволяют размещать его в багажнике внедорожника или крепить к раме квадроцикла, что критично для экспедиций в труднодоступные регионы. Изометрия аппарата в транспортном положении: крылья плотно прилегают к фюзеляжу, обеспечивая минимально возможные габариты (рисунок 2).

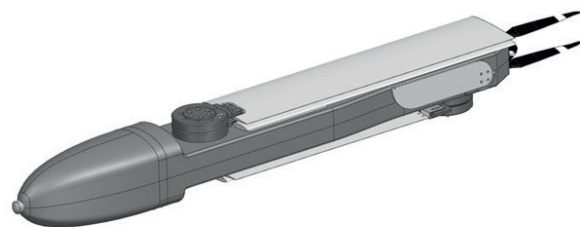


Рисунок 2 — Изометрия БПЛА со сложенными крыльями (транспортное положение)

Такая конфигурация позволяет размещать дрон в компактных транспортно-пусковых контейнерах (ТПК), исключая повреждения при перевозке. Механизм раскрытия крыльев, активируемый электронным контроллером, обеспечивает их фиксацию под углом 120–150 градусов за 2–3 секунды. Инновационная конструкция дронов с раскрывающимися крыльями открывает принципиально новые возможности для их эксплуатации в сложных ландшафтах и урбанистической среде. В отличие от классических квадрокоптеров, требующих для вертикального взлета свободного пространства, равного как минимум двойному размаху винтов, эти аппараты используют компактные складные крылья с раскрывающимся механизмом. При транспортировке крылья плотно прилегают к корпусу, уменьшая габариты устройства на 60–70 %, а при активации мгновенно раскрываются за счет упругих элементов из композитных материалов, сочетающих легкость карбоновых волокон с прочностью титановых сплавов [10]. Эта технология устраняет ключевое ограничение традиционных БПЛА – зависимость от стартовой площадки. Например, в горной местности оператор может запустить дрон прямо с узкой тропы шириной менее метра, где стандартный квадрокоптер с 40-сантиметровыми винтами просто заденет скалы или оборудование. В городских условиях аппарат способен стартовать с ограниченных пространств вроде парапетов высотных зданий, балконов или слуховых окон, где обычные модели рискуют зацепиться лопастями за архитектурные элементы.

Важным преимуществом становится не только компактность, но и повышенная надежность запуска. Раскрывающийся механизм, в отличие от электроприводов или гидравлики, не требует внешнего питания и сохраняет функциональность при экстремальных температурах от –30 °С до +50 °С. Это особенно критично для спасательных операций: дрон можно сбросить с вертолета в сложном состоянии, и при падении на 20–30 метров механизм автоматически активирует крылья, обеспечивая переход в планирующей полет.

Процесс запуска, включая мгновенное раскрытие крыльев при сбросе или ручной активации, показан на рисунке 3. Активация механизма происходит за 2–3 с.

В отличие от мультикоптеров, дроны с раскрывающимися крыльями используют подъемную силу крыла, что позволяет сократить энергопотребление

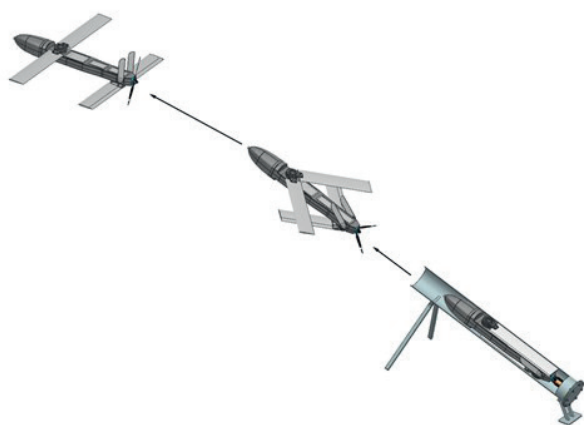


Рисунок 3 – Момент запуска БПЛА с раскрытием крыльев

на 30–40 % при аналогичной грузоподъемности. Раскрытые крылья, изготовленные из углепластиковых композитов, обеспечивают устойчивость к ветру до 15 м/с и дальность полета до 30 км. Для сравнения: большинство гражданских квадрокоптеров теряют управляемость уже при 10 м/с и имеют ограниченную дальность (5–10 км). Эти факторы особенно актуальны для России, где большие расстояния и суровые климатические условия требуют повышенной автономности.

## II. Практическое применение и экономическая эффективность технологии

Преимущества дронов с раскрывающимися крыльями, прежде всего их мобильность, энергоэффективность и способность работать в условиях полного отсутствия подготовленной инфраструктуры, находят практическое применение в различных гражданских отраслях. Конструкция с трансформируемыми крыльями трансформирует БПЛА из узкоспециализированного инструмента, требующего аэродромов или специальных площадок, в универсальную полевую платформу. Это качество становится ключевым для решения задач в регионах с дефицитом инфраструктуры или в чрезвычайных обстоятельствах.

### 1. Мониторинг и инспекция

В Сибири именно дроны с раскрывающимися крыльями, благодаря своей компактности, могли оперативно доставляться и запускаться с ограниченных площадок вдоль трассы трубопровода. Их сочетание устойчивости к ветру (до 15 м/с) и способности к длительному, энергоэффективному полету на малой высоте позволило выявить 8 потенциальных аварийных участков, которые не были заметны при облетах на вертолетах.

Эффективность мониторинга можно оценить по параметрам, указанным в таблице 1.

Расчет экономической эффективности показывает, что при протяженности нефтепровода 100 км использование дронов с раскрывающимися крыльями дает экономию до 92000 рублей на один цикл инспекции по сравнению с вертолетными облетами [12]. Формула расчета:

$$\mathcal{E} = (C_B - C_A) \cdot L + (T_B - T_A) \cdot Z, \quad (1)$$

где  $C_B, C_A$  – стоимость методов, руб./км;

$L$  – длина, км;

$T_B, T_A$  – время, ч;

$Z$  – стоимость часа работы специалиста, руб.

Расчет для вертолета:

$$\mathcal{E}_B = 600 \cdot 100 + 25 \cdot 5000 = 185000 \text{ руб.}$$

Расчет для беспилотного летательного аппарата:

$$\mathcal{E}_{\text{БПЛА}} = 180 \cdot 100 + 15 \cdot 5000 = 93000 \text{ руб.}$$

Экономическая эффективность будет равна:

$$\mathcal{E}_{\text{экон}} = \mathcal{E}_B - \mathcal{E}_{\text{БПЛА}} = 185000 - 93000 = 92000 \text{ руб./цикл.}$$

Таблица 1 – Операционно-экономические показатели методов инспекции

	Параметр				
	Стоимость, руб./км	Скорость, км <sup>2</sup> /ч	Точность, см	Энергопотребление, кВт·ч	Выбросы CO <sub>2</sub> , кг/ч
Беспилотный летательный аппарат	150–200	5–7	±10	0,8–1,2	0,1
Вертолетный облет	500–700	3–4	±50	25,0–30,0	45,0
Наземный осмотр	300–450	0,5–1	±2	–	0

Использование БПЛА с раскрывающимися крыльями обеспечивает:

- 1) финансовую экономию: 92000 руб. на 100 км;
- 2) повышение скорости и точности в 1,5–3 раза;
- 3) снижение экологической нагрузки: приблизительно нулевые выбросы.

Данные подтверждают, что данный вид дронов не только дешевле, но и технологически превосходит вертолеты в задачах мониторинга. Способность к компактному хранению и быстрому запуску в полевых условиях открывает перспективы не только для инспекции, но и для активного вмешательства – в частности, в сельском хозяйстве.

## 2. Сельское хозяйство и точное земледелие

Возможность запуска «с руки» или с борта транспортно-средства кардинально меняет подходы в аграрном секторе. Дроны с раскрывающимися крыльями становятся ключевым инструментом точного земледелия именно потому, что их можно запустить непосредственно с края поля, без подготовки взлетной площадки. Это обеспечивает оперативность и гибкость, критически важные для сезонных работ.

Первой задачей является ликвидация перерасхода удобрений. Традиционное внесение агрохимикатов по усредненным нормам ведет к значительным финансовым и экологическим потерям. Дроны с раскрывающимися крыльями, с установленными на них мультиспектральными датчиками, позволяют перейти к адресному внесению удобрений на основе анализа реального состояния посевов. Например, в Гродненской области Республики Беларусь данная технология уже активно применяется: мультиспектральные датчики используются для мониторинга влажности почвы и уровня азота, что позволило сократить расход удобрений на 20 % и повысить рентабельность выращивания картофеля на 18 % в 2023 году (по данным Министерства сельского хозяйства Беларуси).

Оптимизация сельхозработ с помощью дронов требует точного расчета параметров обработки. Для внесения удобрений используется формула

$$Q = \frac{S \cdot N \cdot K}{10000}, \quad (2)$$

где  $Q$  – количество удобрений, кг;

$S$  – площадь, м<sup>2</sup>;

$N$  – норма внесения, кг/га;

$K$  – поправочный коэффициент [3].

При типовой площади поля 50 га ( $S = 500000$  м<sup>2</sup>,  $N = 200$  кг/га,  $K = 0,75...0,95$ ):

$$Q = \frac{500000 \cdot 200 \cdot 0,9}{10000} = 9000 \text{ кг.}$$

Дроны позволяют сократить перерасход удобрений на 15–20 % за счет точного позиционирования (погрешность ±0,5 м против ±3 м у наземной техники). Например, на поле в 50 га экономия составит около 1350 кг. А при стоимости удобрений 50 руб./кг годовая экономия достигает 67500 руб. на одном поле.

Второй критически важной задачей является управление орошением. Недостаточный или избыточный полив напрямую влияет на урожайность. В Краснодарском крае дроны с раскрывающимися крыльями успешно применяются для контроля влагообеспеченности посевов пшеницы, что привело к увеличению урожайности на 15 %. Эффективность полива оценивается с помощью индекса  $NDVI$  (Normalized Difference Vegetation Index) [10], рассчитываемого на основе данных, полученных с мультиспектральных камер, установленных на дронах:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}, \quad (3)$$

где  $NIR$  – отражение в ближнем инфракрасном диапазоне;

$Red$  – отражение в красном диапазоне.

Значения  $NDVI$  больше 0,6 указывают на здоровые растения, менее 0,3 – на стресс. В Краснодарском крае применение дронов позволило увеличить средних  $NDVI$  с 0,45 до 0,58 за счет точечного полива.

Таким образом, мобильность и аналитические возможности дронов с раскрывающимися крыльями обеспечивают переход от эмпирического подхода к управлению агропредприятием, основанному на точных данных, что ведет к прямой экономической выгоде и устойчивому использованию ресурсов. Эта же способность работать автономно, без зависимости от развитой инфраструктуры, оказывается критически важной и в другой сфере – для оперативной логистики и реагирования в чрезвычайных ситуациях.

### 3. Логистика и реагирование в сложных условиях

Модульность и полная автономность от наземной инфраструктуры делают эти дроны незаменимыми для срочной доставки и работ в районы ЧС. В рамках проекта «Аэродоставка Якутия-2023» дроны перевозили медикаменты в отдаленные поселки, изолированные паводками, выполняя рейсы за 25 минут вместо 2 часов, требовавшихся вертолетам. Пилотные проекты в Якутии, где более 30 % населенных пунктов не имеют круглогодичного транспортного сообщения, показали, что доставка грузов весом до 5 кг может осуществляться за 40 минут вместо 3 часов наземным транспортом с экономией до 70 %.

В экстренных ситуациях преимущества дронов с раскрывающимися крыльями, в том числе способность к немедленному разворачиванию, становятся особенно очевидными. Например, во время урагана в Краснодарском крае (2022 г.) они оперативно доставляли портативные ретрансляторы в зоны, оставшиеся без связи, что позволило координировать действия спасателей.

Еще один пример был продемонстрирован в сложных условиях Кавказа, где эти аппараты, оснащенные ИК-камерами, использовались для поиска пропавших туристов: обнаружение заняло всего 1,5 часа вместо 6 часов, необходимых пешим группам.

### III. Перспективы развития и социально-экономический эффект

Массовое внедрение технологии требует решения ряда задач. Средняя стоимость подобных дронов варьируется в диапазоне от 800 000 до 2 500 000 рублей, что ограничивает их доступность для малого бизнеса. Существующее время полета, составляющее от 30 до 90 минут, также остается недостаточным для масштабных мониторинговых миссий. Однако текущие исследования направлены на преодоление этого ограничения. Например, разработки Московского авиационного института и Казанского авиационного института показывают, что комбинирование солнечных панелей (КПД 22–24 %) с литий-ионными аккумуляторами теоретически способно увеличить автономность до 2–3 часов. Такое повышение выносливости критически важно для эффективного мониторинга протяженных объектов. Это подтверждается уже имеющимся опытом: так, при инспекции нефтепроводов в Тюменской области использование дронов даже с текущим временем полета позволило сократить общее время инспекции на 50 % по сравнению с вертолетными облетами за счет оперативности разворачивания и точности обследования.

Социально-экономический эффект от внедрения технологии включает снижение затрат на логистику в труднодоступных регионах, повышение точности мониторинга сельхозугодий (что, как показано выше, ведет к оптимизации расходов и повышению урожайности) и создание новых высокотехнологичных рабочих мест. Интеграция дронов в национальную транспортную систему требует развития нормативной базы. В России уже ведется работа над классификацией беспилотников и сертификацией их компонентов, что создает основу для безопасного внедрения [13].

Перспективным направлением является совершенствование материалов и энергоэффективности.

Использование композитных материалов, таких как углепластик, снижает массу конструкции без потери прочности. Исследования В. И. Гуляева и В. В. Зеленова подтверждают, что композиты повышают устойчивость крыльев к деформациям при экстремальных нагрузках [1]. Дальнейшее развитие связано с интеграцией искусственного интеллекта для автономного анализа данных в реальном времени, что откроет новые возможности для решения социально-экономических задач. Социально-экономический эффект от внедрения технологии включает снижение затрат на логистику в труднодоступных регионах, повышение точности мониторинга сельхозугодий и создание новых высокотехнологичных рабочих мест.

Интеграция дронов с раскрывающимися крыльями в национальную транспортную систему требует развития нормативной базы и стандартов [12]. Современные исследования подчеркивают, что законодательная база для БПЛА должна учитывать как технологические особенности, так и этические риски, связанные с автономностью систем [6].

Важным аспектом развития дронов с раскрывающимися крыльями является оптимизация их аэродинамического профиля для различных режимов полета. Исследования, проведенные в Центральном аэрогидродинамическом институте им. Н. Е. Жуковского, демонстрируют, что применение адаптивных крыльев с изменяемой кривизной позволяет повысить маневренность данных аппаратов на низких высотах. Например, в ходе испытаний в аэродинамической трубе модели с гибкой задней кромкой крыла показали снижение турбулентности на 12–15 % при скоростях до 25 м/с [7]. Изометрия дрона в полетной конфигурации: крылья полностью раскрыты, аэродинамические поверхности активированы для максимальной подъемной силы (рисунок 4).

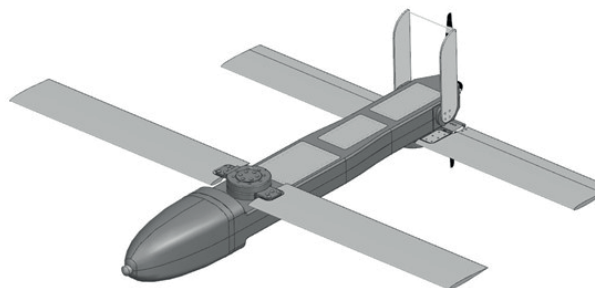


Рисунок 4 – Изометрия БПЛА с раскрытыми крыльями (полетная конфигурация)

Такая конструкция обеспечивает стабильность даже в турбулентных потоках урбанизированной среды. Это особенно актуально для полетов в городской среде, где необходимо быстро реагировать на динамичные воздушные потоки между зданиями. Такие решения уже тестируются в рамках проекта «Умный город» в Казани, где дроны используются для мониторинга строительных площадок и оперативного выявления нарушений норм безопасности.

Еще одним перспективным направлением становится интеграция дронов с раскрывающимися крыльями в системы предиктивной аналитики. В Архангельской области подобные аппараты, оснащенные

лидерами и нейросетевыми алгоритмами, применяются для прогнозирования обрушения кровель исторических зданий. Сканируя структуру деревянных конструкций с точностью до 1 мм, дроны формируют 3D-модели, которые анализируются на предмет микротрещин и деформаций. В 2023 году это позволило предотвратить аварию на объекте культурного наследия в Каргополе [8], где система заранее выявила критический изгиб несущей балки. Подобные технологии могут быть масштабированы для мониторинга мостов, плотин и других инфраструктурных объектов, снизить риски техногенных катастроф в рамках реализации стратегии «Цифровая экономика» [6].

### Заключение

Полученные данные, представленные в статье, убедительно доказывают, что дроны с раскрывающимися крыльями являются не очередной инкрементальной инновацией, а трансформационной технологией, принципиально меняющей подходы к решению задач в гражданских отраслях. Их уникальная ценность заключается в способности полностью устранять зависимость от стационарной инфраструктуры, что делает их ключевым инструментом для работы в условиях географической изоляции, сложного рельефа или чрезвычайных ситуаций. Возможность функционировать в экстремальных условиях (температурный диапазон

от  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , устойчивость к ветру до 15 м/с), адаптироваться к разнообразным задачам за счет модульной архитектуры и радикально снизить операционные затраты делает их незаменимыми для критически важных сфер: логистики в труднодоступных регионах (как в проекте «Аэродоставка Якутия-2023»), точного сельского хозяйства — где Республика Беларусь демонстрирует успешное применение технологии: в Гродненской области мультиспектральные сенсоры на таких дронах сократили расход удобрений на 20 % и повысили рентабельность картофелеводства на 18 %, а также экологического мониторинга (снижение выбросов  $\text{CO}_2$  до 0,1 кг/ч). Дальнейшее развитие технологии напрямую зависит от прогресса в трех направлениях: совершенствование композитных материалов (углепластик), внедрение гибридных энергосистем (солнечные панели + Li-Ion аккумуляторы) для увеличения автономности до 2–3 часов, а также глубокая интеграция искусственного интеллекта для предиктивной аналитики и автономного управления в реальном времени. Эти усовершенствования открывают новые возможности для решения актуальных социально-экономических задач — от оптимизации логистики в Арктике и внедрения передовых агротехнологий в Беларуси до предотвращения техногенных катастроф — укрепляя позиции стран ЕАЭС в рамках стратегии цифровой экономики.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гуляев В. И., Зеленцов В. В. Композитные материалы в авиационной технике. – М.: Машиностроение, 2018. – 416 с.
2. Соколов А. Н., Петров Д. И. Гибридные источники энергии для беспилотных летательных аппаратов // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2021. – № 11. – С. 23–34.
3. Кузнецова Л. М., Иванов С. К. Применение беспилотных систем в сельском хозяйстве. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2020. – 154 с.
4. Стратегия развития цифровой экономики в Российской Федерации на период до 2030 года: Утв. распоряжением Правительства РФ № 1632-р от 28.07.2017. – URL: <http://static.government.ru>.
5. ГОСТ 9.048-2022. Единая система защиты от коррозии и старения. Технические изделия. Методы лабораторных испытаний на устойчивость к воздействию плесневых грибов. – Введ. 2023-07-01. – М.: Стандартинформ, 2023. – 18 с.
6. Абдуллин И. Н., Сунгатуллин Р. Г. Правовые и этические аспекты использования беспилотников // Цифровые технологии в транспорте. – 2023. – № 4. – С. 12–19.
7. Исследование аэродинамических характеристик адаптивных крыльев БПЛА / Под ред. Смирнова А. К. – Жуковский : ЦАГИ, 2022. – 68 с.
8. Доклад о применении цифровых технологий в сохранении объектов культурного наследия / Минкультуры РФ. – М.: ФГУП «Наследие», 2023. – 48 с.
9. Петров К. А. Транспортно-пусковые системы для БПЛА // Авиакосмические системы. – 2022. – № 3. – С. 45–52.
10. Johnson M.R. Deployable Wing Mechanisms in UAV Design // Journal of Aerospace Engineering. – 2021. – Vol. 34. – P. 112–125.
11. Белов А. С. Экономическая эффективность БПЛА в логистике // Транспортная инфраструктура. – 2023. – № 1. – С. 30–38.
12. ISO 21384-3:2019. Unmanned aircraft systems – Part 3: Operational procedures. – Geneva: ISO, 2019.
13. Беликова К. М. Правовые аспекты сотрудничества в условиях фрагментации международного права // Журнал зарубежного законодательства и сравнительного правоведения. – 2024. – № 3. – С. 51–61.

### REFERENCES

1. Gulyaev V.I., Zelentsov V.V. Kompozitnyye materialy v aviatsionnoy tekhnike [Composite Materials in Aviation Technology]. Moscow, Mashinostroyeniye, 2018, 416 p. (in Russian).
2. Sokolov A.N., Petrov D.I. Gibridnyye istochniki energiy dlya bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Hybrid energy sources for unmanned aerial vehicles]. Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii [Engineering Journal: Science and Innovations], 2021, no. 11, pp. 23–34 (in Russian).
3. Kuznetsova L.M., Ivanov S.K. Primeneniye bespilotnykh sistem v sel'skom khozyaystve [Application of Unmanned Systems in Agriculture]. Moscow, FGBNU "Rosinformagrotekh", 2020, 154 p. (in Russian).
4. Strategiya razvitiya tsifrovoy ekonomiki v Rossiyskoy Federatsii na period do 2030 goda [Digital Economy Development Strategy in the Russian Federation until 2030]. Approved by Order of the Government of the Russian Federation No. 1632-r dated 28.07.2017. Available at: <http://static.government.ru> (in Russian).
5. GOST 9.048-2022. Edinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Tekhnicheskiye izdeliya. Metody laboratornykh ispytaniy na ustoychivost' k vozdeystviyu plesnevnykh gribov [Unified system of corrosion and ageing protection. Technical products. Laboratory test methods for resistance to mould fungi]. Moscow, Standartinform, 2023, 18 p. (in Russian).
6. Abdullin I.N., Sungatullin R.G. Pravovyye i eticheskiye aspekty ispol'zovaniya bespilotnikov [Legal and ethical aspects of drone use]. Tsifrovyye tekhnologii v transporte [Digital Technologies in Transport], 2023, no. 4, pp. 12–19 (in Russian).
7. Smirnov A.K. (ed.) Issledovaniye aerodinamicheskikh kharakteristik adaptivnykh krylyev BPLA [Study of aerodynamic characteristics of adaptive UAV wings]. Zhukovskiy, TsAGI, 2022, 68 p. (in Russian).
8. Doklad o primenenii tsifrovyykh tekhnologiy v sokhranenii ob'yektov kul'turnogo naslediya [Report on the use of digital technologies in the preservation of cultural heritage sites]. Moscow, FGUP "Naslediyey", 2023, 48 p. (in Russian).
9. Petrov K.A. Transportno-puskovyye sistemy dlya BPLA [Transport and launch systems for UAVs]. Aviakosmicheskiye sistemy [Aerospace Systems], 2022, no. 3, pp. 45–52 (in Russian).
10. Johnson M.R. Deployable wing mechanisms in UAV design. Journal of Aerospace Engineering, 2021, vol. 34, pp. 112–125.
11. Belov A.S. Ekonomicheskaya effektivnost' BPLA v logistike [Economic efficiency of UAVs in logistics]. Transportnaya infrastruktura [Transport Infrastructure], 2023, no. 1, pp. 30–38 (in Russian).
12. ISO 21384-3:2019. Unmanned aircraft systems. Part 3: Operational procedures. Geneva, ISO, 2019.
13. Belikova K.M. Pravovyye aspekty sotrudnichestva v usloviyakh fragmentatsii mezhdunarodnogo prava [Legal aspects of cooperation in the context of fragmentation of international law]. Zhurnal zarubezhnogo zakonodatel'stva i sravnitel'nogo pravovedeniya [Journal of Foreign Legislation and Comparative Law], 2024, no. 3, pp. 51–61 (in Russian).

Статья поступила в редакцию  
30.06.2025

# НИЗКИЕ УРОВНИ РАДИАЦИИ В АВИАЦИИ И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

## LOW LEVELS OF RADIATION IN AVIATION AND THE ENVIRONMENT

**Кириленко Алексей Иванович** – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой естественнонаучных и общепрофессиональных дисциплин учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь  
end-bsaa@yandex.ru

**Alexey Kirilenko** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Natural Sciences and General Professional Disciplines of the Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus  
end-bsaa@yandex.ru

**Шуруй Владимир Геннадьевич** – курсант факультета гражданской авиации учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь  
end-bsaa@yandex.ru

**Vladimir Shuruy** – Cadet of the Belarusian State Academy of Aviation  
end-bsaa@yandex.ru

**Аннотация:** рассматриваются антропогенные и естественные источники низкоуровневой радиации, воздействию которых подвергаются лица, не имеющие прямого контакта с радиоактивными веществами, но находящиеся под периодическим и длительным их воздействием. Примером могут служить экипажи воздушных судов. Основная опасность такого облучения заключается в кумулятивном эффекте – постепенном накоплении поврежденных организмов на молекулярном, клеточном и тканевом уровнях.

Подчеркивается, что основная особенность в обращении человека с радиацией – максимально минимизировать контакты человека с радиоактивными веществами и, если это возможно, повсеместно заменять их в приборах и устройствах более безопасными. Обращается внимание на то, что, несмотря на отмеченную политику в области обращения с радиацией, контакты человека с ней все более расширяются не только за счет появления новых приборов с радиоактивными материалами, но и за счет проникновения все большего количества людей в высокие слои атмосферы и в ближний космос. Рассматриваются современные методы защиты от радиации. Отмечается появление новых материалов, обеспечивающих снижение облучения: графеновые покрытия, композиты, содержащие самарий, сэндвич-структуры с аэрогелем, содержащим бор. Обсуждаются проблемы измерения низких уровней радиации.

**Ключевые слова:** радиоактивность, дозовая нагрузка, кумулятивный эффект, источники радиации, радиоизотопы.

**Abstract:** anthropogenic and natural sources of low-level radiation are considered, to which persons who do not have direct contact with radioactive substances, but are subject to their periodic and long-term impact, are exposed. An example is aircraft crews. The main danger of such irradiation is the cumulative effect – the gradual accumulation of damage to organisms at the molecular, cellular and tissue levels.

It is emphasized that the main feature in human handling of radiation is to minimize human contacts with radioactive substances and, if possible, to replace them in devices and equipment with safer ones everywhere. Attention is drawn to the fact that, despite the noted policy in the field of radiation handling, human contacts with it are increasingly expanding not only due to the emergence of new devices with radioactive materials, but also due to the penetration of an increasing number of people into the upper layers of the atmosphere and into near space. Modern methods of protection against radiation are considered.

The emergence of new materials that reduce radiation is noted: graphene coatings, composites containing samarium, sandwich structures with aerogel containing boron. The problems of measuring low levels of radiation are discussed.

**Keywords:** radioactivity, dose load, cumulative effect, radiation sources, radioisotopes.

### Введение

В настоящее время наблюдается тенденция к расширению сферы применения радиоактивных веществ. В различных отраслях активно используются более 60 радиоизотопов, и этот список постоянно пополняется новыми элементами. Примечательно, что чем выше уровень технологического развития и наукоемкости отрасли экономики, тем шире спектр применения радиоактивных материалов. Ярким примером служит авиационная промышленность, где радиоизотопы находят разнообразное применение. Несмотря на наличие строгих правил и норм обращения с радиоактивными веществами, некоторая их часть

все же попадает в окружающую среду, хотя и в незначительных количествах. Это требует постоянного контроля и совершенствования мер безопасности для минимизации потенциального негативного воздействия на экосистему.

При обращении с радиоактивными веществами действует принцип: если приборы и устройства с радиацией можно заменить – это необходимо сделать. Этот принцип сформулирован не сегодня. Его значение в наше время возросло в связи с обнаружением кумулятивного эффекта [1], когда низкие дозы радиации накапливаются в организме и повреждают его. Авиационные стандарты запрещают использование радиоактивных материалов без веских на то оснований.

В связи с этим актуально указать источники малых доз. Действующее законодательство устанавливает строгие правила обращения с радиоактивными веществами, контролируя их сбор, транспортировку, хранение и утилизацию для предотвращения загрязнения окружающей среды. Под низкими уровнями мы будем понимать уровни равные или ниже экологически безопасного порога, составляющего примерно  $2 \cdot 10^{-7}$  Зв/час. Выделим четыре основных источника радиации малых доз:

- естественные радиоактивные источники (из них наибольший вклад дают калий, радий, торий и другие);
- медицинская диагностика, происхождения на АЭС, дефектоскопия в промышленности;
- последствия ядерных взрывов (подземных) — выбрасываются радиоактивные газы (криптон, ксенон);
- последствия техногенных аварий: Фукусима (11.03.2011), Чернобыль (26.04.1986) и др.

Еще один весьма важный локальный источник — небрежное обращение с приборами и оборудованием, содержащим радиоактивные изотопы [2].

### Основная часть

Цель работы — обратить внимание на источники малых доз радиации, прежде всего в технических устройствах. В этом плане наибольший интерес представляет авиационная техника, поскольку арсенал устройств с радионуклидами в авиации довольно обширен. Для составления представления о порядках величин малых доз радиации, произведем расчет.

При накоплении электростатического заряда на поверхности летательного аппарата в процессе полета (в результате трения воздуха о корпус и воздействия атмосферных электрических явлений) возникает необходимость его нейтрализации, для этих целей применяются разрядники, содержащие радиоактивные препараты. Ориентировочный расчетный заряд составляет  $0,3 \cdot 10^{-3}$  Кл, для компенсации данного положительного заряда возможно применение  $\beta$ -активных радиоактивных препаратов, например  $^{137}\text{Cs}$  с периодом полураспада  $2,59 \cdot 10^6$  с. При этом постоянная распада ядер  $\lambda = \ln(2)/T_{1/2} = 2,66 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ . Для того, чтобы компенсировать заряд самолета нужен распад  $1,87 \cdot 10^{15}$  ядер. Если количество распадов  $dN$  за время  $dt$  равно  $\lambda N dt$ , а время снятия заряда приблизительно равно  $10^{-1}$  с, то исходное количество ядер в препарате составит  $7 \cdot 10^{22}$ . Это очень большая величина, но в любом случае она будет порядка числа Авогадро. Итого понадобится  $16 \text{ г } ^{137}_{55}\text{Cs}$ . Проведенный расчет дает представление о работе радиоизотопных разрядников. Реальные разрядники работают в постоянном режиме и не допускают накопления большого заряда на объектах. Отметим, что в системах запуска газотурбинных двигателей используется радионуклидные разрядники, содержащие  $\beta$ -активный изотоп  $^{147}_{61}\text{Pm}$ , либо  $^{63}_{28}\text{Ni}$ . В радиоизотопном сигнализаторе обледенения РИО-3 используется  $\beta$ -активный изотоп  $^{90}_{38}\text{Sr}$ .

Важным для авиации оказывается еще одно малоизученное явление. Известно, что при штатной эксплуатации ядерных реакторов АЭС в окружающую среду выбрасываются радиоактивные ксенон, криптон, йод, а также  $^{60}_{27}\text{Co}$ ,  $^{90}_{38}\text{Sr}$ ,  $^{137}_{55}\text{Cs}$  (всего несколько десятков радионуклидов) и аэрозоли. Они образуют в приземном слое толщиной 2–3 км своеобразные полосы в направлении ветра длиной до 200 км и шириной до 30 км со

временем жизни в несколько суток. Если в атмосфере в этой полосе возникают конвективные ячейки, формирующие грозовые облака, то они будут содержать повышенное количество радиоактивных частиц. Как результат при распаде высокоэнергетичных частиц происходит резкое усиление ионизации воздуха, что влечет за собой электризацию облаков с плотностью заряда десятки и сотни нанокулон на метр кубический. Возьмем для примера облако типа Сб (Cumulonimbus, или кучево-дождевое) скромных размеров: толщина облака 5 км, горизонтальные размеры 1 км, объем  $5 \cdot 10^9 \text{ м}^3$ . Накопленный в нем заряд составляет не менее 50 Кл. Молния переносит заряд порядка 6 Кл. Таким образом, «скромное» облако может обеспечить порядка десяти разрядов. Выбросы АЭС повышают частоту и интенсивность молний, а это препятствует нормальной работе авиации. Влияние атмосферных явлений на ионосферу не ограничивается только грозами. Мощные грозовые образования генерируют электрические поля в области ионосферы (на высоте 120–140 км) с напряженностью до 6 мВ/м. Это приводит к значительному снижению концентрации электронов в спорадическом Е-слое (особенно заметному на средних широтах, где показатель может уменьшаться на порядок). Подобные изменения в структуре ионосферы существенно влияют на условия распространения радиоволн, что демонстрирует воздействие даже относительно слабых ионизирующих факторов на состоянии верхних слоев атмосферы.

Радиоизотопные источники энергии обладают высоким потенциалом применения в авиационной сфере. Их эффективность подтверждена внедрением в навигационное оборудование взлетно-посадочных полос трития, особенно на удаленных аэродромах с затрудненным техническим обслуживанием. Широкое применение нашли радиоизотопные термоэлектрические генераторы (РИТЭГ), диапазон используемых мощностей которых весьма широк. Ранее РИТЭГи считались оптимальным решением для энергоснабжения навигационных систем — бакенов, маяков и светосигнального оборудования. В настоящее время происходит повсеместная замена радиоизотопных источников на альтернативные энергоустановки, не содержащие радиоактивных материалов, преимущественно на солнечные энергосистемы. Причина состоит в невозможности контроля над отработанными батареями. В настоящее время для РИТЭГ осталась только одна ниша — дальний космос. В зонде New Horizons (2006 г.) содержалось 11 кг высокочистого диоксида плутония  $^{238}_{94}\text{Pu}$ , что обеспечивало начальную мощность 240 Вт.

Швейцарские разработчики из SenseFly предложили источник для микро-БЛА массой 2 мг, использующий  $\beta$ -излучатель  $^{35}_{16}\text{S}$ . Расход радиоизотопа 0,3 мг в неделю, что обеспечивает тепловую мощность 4 мВт и электрическую — 0,6 мВт. Космонавтика проявляет интерес и к ядерным двигателям. Ранее такие двигатели разрабатывались для авиации. Ими был снабжен Ту-95ЛАЛ (1956–1962) с четырьмя турбовальными двигателями (ТВД). Дальнейшие работы в данной области двигателестроения были прекращены и в СССР, и в США по причине неприемлемых уровней радиации. Однако в настоящее время считается, что ракетные двигатели на жидком топливе свои возможности исчерпали. Для полета на Луну более перспективными являются ядерные двигатели мегаваттных мощностей [3].

Отметим, что объемы радиоактивных отходов АЭС составляют тысячи тонн в год, кроме отработанного ядерного топлива. К отходам причисляется любой предмет, который достаточно долго контактировал с ионизирующим излучением.

Естественная радиационная обстановка характеризуется повсеместным распространением ионизирующих излучений низких интенсивностей. В качестве иллюстрации эндогенного радиационного фона можно привести присутствие изотопа  $^{40}_{19}\text{K}$  в организме человека, который демонстрирует постоянную скорость радиоактивного распада, составляющую приблизительно  $4 \cdot 10^3$  актов распада в секунду. Дополнительными источниками низкоуровневой радиации являются горнодобывающая промышленность и сжигание ископаемого топлива. Золошлаки от сжигания угля, древесины могут содержать радиоактивные вещества в количествах, сравнимых с низкоактивными отходами АЭС. Не следует сбрасывать со счетов и лесные пожары в загрязненных территориях. Расширение сферы применения радиоизотопов неизбежно ведет к увеличению отходов и загрязнению ими окружающей среды.

Несмотря на очевидные ограничения, сфера использования радиоактивных материалов только расширяется, а значит, будет увеличиваться и количество отходов. Поэтому изучение действия низких уровней радиации на окружающую среду и материалы не теряет своей актуальности.

Существующие нормативы радиационной безопасности требуют регулярной актуализации с учетом новых данных о кумулятивных и стохастических последствиях действия радиации. Понимание биологических основ кумулятивного эффекта малых доз радиации имеет не только фундаментальное значение для науки, но и практическую важность для разработки стратегий защиты населения и профессиональных групп риска.

Следует остановиться на радиационной обстановке на эшелонах полета воздушных судов. Одним из значимых факторов радиационного воздействия на экипаж воздушных судов является космическое излучение — поток высокоэнергичных частиц, проникающих в атмосферу Земли из космического про-

странства. Поскольку атмосфера выполняет функцию естественного радиационного щита, уменьшение ее толщины на больших высотах приводит к увеличению уровня облучения. Следовательно, высота полета является одним из определяющих факторов дозовой нагрузки на экипаж.

На высоте около 12000 метров доза облучения существенно выше, чем на высоте 6000 метров за счет ослабления защитного эффекта атмосферы. Помимо высоты, значительное влияние оказывает и географическая широта: вблизи магнитных полюсов Земли структура магнитного поля изменяется, что приводит к повышенному проникновению космических частиц. В связи с этим полеты в высоких широтах сопряжены с большими уровнями радиационного облучения по сравнению с маршрутами, проходящими вблизи экватора [4].

Еще одним важным фактором является состояние солнечной активности и, в частности, геомагнитные бури (таблица 1). Во время бурь, вызванных вспышками на Солнце и выбросами корональной массы, потоки солнечных протонов и энергетических частиц увеличиваются, что может привести к временному увеличению уровня радиации в атмосфере.

Планетарный индекс (Кр) (от "planetarische Kennziffer") — международный показатель (шкала от 0 до 9), измеряет глобальную геомагнитную активность, рассчитывается на основе данных с нескольких обсерваторий по всему миру. При спокойной геомагнитной обстановке (индекс Кр 0–2) на высоте 9000 метров доза облучения составляет около 3 мкЗв/ч. В условиях сильной геомагнитной бури (Кр 6–9) она может возрастать до 6 мкЗв/ч. На высоте 12 000 метров эти значения увеличиваются: около 5 мкЗв/ч при спокойной геомагнитной обстановке и до 10 мкЗв/ч во время мощной бури. Нормы дозовой нагрузки приведены в таблице 2.

В авиации принята система мер по снижению воздействия малых доз радиации. Прежде всего, следует проводить мониторинг солнечной активности. Перед полетом рекомендуется проверять прогнозы солнечной активности и геомагнитных бурь. Затем следует выбор маршрута и высоты полета: при высокой солнечной активности целесообразно выбирать маршруты с меньшими высотами и избегать полетов в высоких широтах. Немаловажную роль играет индивидуальный контроль над получаемой дозой облучения, что обеспечивается дозиметрами.

Геомагнитная активность оказывает значительное влияние на получаемые дозы облучения. В периоды высокой солнечной активности и геомагнитных бурь дозы облучения могут увеличиваться в несколько раз. Таким образом, космическое излучение представляет собой важный фактор профессиональной радиационной опасности для авиационного персонала, требующий постоянного контроля и принятия мер по снижению индивидуальных доз облучения. Система мер контроля над воздействием малых доз радиации

Таблица 1 — Оценка интенсивности геомагнитной бури и ее воздействие на дозу космического излучения

Планетарный индекс	Воздействие на дозу излучения	Характеристика
0–2	Незначительное увеличение уровня излучения	Слабая буря
3–5	Увеличение дозы облучения	Умеренная буря
6–9	Значительное повышение уровня излучения	Сильная буря

Таблица 2 — Нормы Международной организации гражданской авиации (ИКАО) и реальные значения доз радиации в зависимости от налета часов и геомагнитной нагрузки

Параметр	Норма ИКАО (максимальная доза)	Реальные значения дозы	Примечания (учет геомагнитной нагрузки)
Годовая доза облучения	5–6 мЗв/год	2–5 мЗв/год	Во время геомагнитных бурь (КР 6–9): 4–10 мЗв/год
Средний налет в год (900–1000 ч)	5–6 мЗв	4–5 мЗв	Полеты в высоких широтах и на больших высотах увеличивают дозу: 4–12 мЗв/год
Налет 1000 часов (на высоте 12000 м)	5–6 мЗв	4,5 мЗв (спокойная геомагнитная обстановка)	При сильных бурях (КР 7–9): 8–10 мЗв
Доза за 1 ч (на высоте 9000 м)	0,004 мЗв	0,003–0,005 мЗв	При сильных бурях: до 0,01 мЗв
Доза за 1 ч (на высоте 12000 м)	0,006 мЗв	0,004–0,006 мЗв	При сильных бурях: до 0,02 мЗв

в авиации, особенно на экипажи, может считаться всеобъемлющей. Тем не менее, проблемы остаются. Они относятся в основном к загрязнению окружающей среды.

К следующей области применения ионизирующих излучений низкой интенсивности относится сегмент авиационного приборного оборудования. Светомасса постоянного действия (СПД) использовалась до конца 50-х годов для создания постоянно светящихся надписей в кабине пилотов. Также ее использовали в авиационных приборах для люминесцентной подсветки, нанося на цифры и стрелки. Это, как правило, соединение сульфида цинка или других металлов с добавкой соли радия ( $^{226}\text{Ra}$ ). Содержание радия составляет до 300 мкг ( $9 \cdot 10^{17}$  ядер), что обеспечивает  $1,2 \cdot 10^7$  распадов в секунду и выделение такого же количества  $\alpha$ -частиц на грамм краски. От того, сколько радия содержит краска, зависит яркость свечения надписей, цифр или шкал [5]. В настоящее время, приборы с СПД представляют большую проблему утилизации.

Внутри приборов радий ( $^{226}\text{Ra}$ ) не представляет серьезной опасности, гораздо хуже, когда осыпается краска с приборных панелей и превращается в пыль. Также присутствует опасность разбить стекло прибора, после чего СПД превращается в разнесенную по кабине пыль. Определить наличие СПД на приборах без дозиметра можно по характерному «буро-горчичному» цвету надписей. Мощность эквивалентной дозы  $\gamma$ -излучения от циферблата может превышать  $10^{-5}$  Зв/ч, что в 100 раз превышает нормальный природный фон. Высокий уровень радиационного излучения — это не единственная опасность, которая таится в светящихся приборах. Дело в том, что  $^{226}\text{Ra}$  распадается с образованием радиоактивного изотопа  $^{222}\text{Rn}$ , который является газом и легко выходит за пределы корпуса.

Радон — инертный газ, являющийся продуктом распада  $^{226}\text{Ra}$  который в свою очередь, образуется в результате распада  $^{238}\text{U}$ . Количество радона от радиоактивных приборов в единичных количествах ничтожно,

и не представляет собой какой-либо опасности, но с увеличением количества таких приборов в закрытом и непроветриваемом помещении, может серьезно повредить здоровью. Типичный пример — кабина самолета.

Наиболее значительные риски, связанные с устройствами, содержащими радиоактивную светомассу, реализуются в двух случаях: при нарушении целостности защитного покрытия (стекла) и при несанкционированной разборке устройства неподготовленным персоналом. Кроме того, в процессе эксплуатации в результате радиоллиза происходит деградация светомассы постоянного действия, которая начинает осыпаться с образованием частиц различного размера — от мелкодисперсной пыли до крупных фрагментов. В старых приборах с поврежденными резиноуплотнительными элементами эти радиоактивные частицы попадают в окружающую среду, создавая угрозу инкорпорации в организм через дыхательные пути или желудочно-кишечный тракт, и потенциально повышая риск возникновения онкологических заболеваний.

Уран и радий в малых пропорциях содержатся в земной коре. На долю радона приходится примерно половина всего излучения, которому подвергается человек в течение жизни. В ряде основных причин возникновения рака легких этот газ занимает второе место после курения и является первой причиной развития рака легких у некурящих. По оценкам ВОЗ, радон вызывает от 3 % до 14 % всех случаев рака легких [6].

Нами разработан прибор на базе существующего радиометра, позволяющий обнаруживать радон, и проведены измерения в непроветриваемом подвале дома и в кабине списанного самолета. Гипотеза об образовании радона в кабине полностью подтвердилась. Уровни примерно такие же, как и в подвале. Утилизация радиоактивных изделий, в которых используется светомасса постоянного действия, представляет собой актуальную и нерешенную проблему радиационной безопасности. Поскольку в настоящее время не суще-

ствуется универсальных и экологически безопасных методов полной дезактивации подобных объектов.

Лабораторные исследования показали, что даже после тщательного удаления радиоактивного люминофорного покрытия с поверхности циферблата, остаточный уровень радиационного излучения корпуса составляет не менее 50 % от исходного значения. Это свидетельствует о глубокой и стойкой миграции радионуклидов в материал прибора, что делает полную очистку практически невозможной. Учитывая массовое распространение подобных изделий, особенно в авиационной и военной технике середины XX века, данная проблема требует системного подхода. Тем не менее, в настоящее время она остается недостаточно проработанной, что подтверждается случаями появления радиоактивных предметов на несанкционированных свалках как результат бесконтрольного хранения и утилизации.

Проблема незаконного оборота радиоактивных приборов остается малоизученной, что является следствием сложившейся в советский период практики строгой засекреченности любых данных, связанных с радиоактивными препаратами. В современных условиях для минимизации рисков необходимо проводить целенаправленную работу по информированию широких слоев населения, а также специалистов, чья деятельность не связана с радиационной безопасностью, об опасности таких источников. При длительном и повторяющемся воздействии даже малых доз ионизирующего излучения возрастает риск накопления кумулятивных биологических эффектов, что обуславливает необходимость разработки эффективных средств радиационной защиты.

Применяемые в авиации алюминиевые сплавы не обладают защитными свойствами от ионизирующих излучений, особенно в отношении высокоэнергичных заряженных частиц и нейтронов. Перспективными являются следующие решения:

- графеновые покрытия. Благодаря высокой плотности электронов в своей двумерной структуре графен эффективно рассеивает заряженные частицы высоких энергий. К тому же нанокompозитные покрытия на основе графена обладают высокой механической прочностью и термостойкостью;

- композиты с добавлением самария, который характеризуется высокими коэффициентами поглощения нейтронного и гамма-излучения. Введение самариевых наполнителей в полимерные матрицы позволяет создавать композиты, обеспечивающие эффективную защиту от космической радиации при сохранении требуемых механических характеристик.

- сэндвич-структуры с аэрогелями, содержащими бор. Аэрогели с борными добавками демонстрируют высокую эффективность в защите от тепловых и эпитепловых нейтронов за счет высоких сечений захвата нейтронов атомами бора. Сэндвич-панели, в которых аэрогель заключен между слоями легких композитов, могут использоваться для защиты критически важных зон фюзеляжа и пассажирских салонов, обеспечивая при этом несущественное увеличение массы конструкции [7].

Помимо разработки новых материалов, важную роль в защите экипажей и пассажиров от космического излучения играют системы активного контроля и мониторинга радиационной обстановки, что позво-

ляет оперативно принимать решения о коррекции маршрута полета.

Комплексный подход, включающий создание новых защитных материалов, применение систем мониторинга и адаптивное планирование маршрутов, является магистральным направлением в обеспечении радиационной безопасности в современной авиации.

Методы защиты, пригодные для авиации, могут применяться в любой отрасли хозяйственной деятельности. Как отмечалось, определенная роль в защите от излучений отводится мониторингу. Поэтому большое значение имеют биологические организмы способные накапливать радиоактивные материалы. По сути, они являются природными биоиндикаторами радиационного загрязнения. На территории Беларуси индикаторами  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  являются мхи и лишайники.

Содержание этих радионуклидов, попавших в окружающую среду после Чернобыльской катастрофы, значительно до сих пор. В пищевые цепи человека они попадают через злаковые культуры, грибы, ягоды, мясо диких животных.

Ил, аккумулирующийся на дне водоемов, также накапливает радионуклиды  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . Хотя сам по себе ил в радиационном отношении опасности не представляет, но флора и фауна, обитающая в придонных слоях или взаимодействующая с донными отложениями, активно накапливает радионуклиды. Ил служит надежным индикатором пространственного распределения радиоактивного загрязнения [8].

Современные санитарные нормы и системы мониторинга в основном ориентированы на контроль высоких доз радиации. Кумулятивный эффект действия малых доз недооценивается. Следовательно есть необходимость более тщательных исследований, совершенствования нормативной базы, развития систем раннего обнаружения потенциальных источников радиации и информирования населения о потенциальных рисках. Все отмеченные проблемы упираются в наличие достаточно чувствительных радиометров.

## Заключение

В рамках проведенного исследования нами был осуществлен анализ содержания радиоактивности в различных объектах техногенного и бытового происхождения. Отметим, что нами не проводилось количественное определение радиоактивности, просто фиксировался  $\gamma$ -фон. Особое внимание было уделено радиоактивным отходам, выявленным на открытых участках несанкционированных свалок, включая фрагменты авиационных приборов с остаточной радиоактивной светомассой, обнаруженные как в кабинках списанной авиационной техники, так и непосредственно на территории утилизационных площадок.

Также проведены измерения концентрации радона и его дочерних продуктов распада в слабо вентилируемых подвальных помещениях с использованием разработанного нами детектора, предназначенного для регистрации  $\beta$ -активных продуктов. По результатам эксперимента были зафиксированы превышения фоновых значений, подтверждающие необходимость периодического радиационного мониторинга в подобных условиях.

В рамках исследования была проверена гипотеза о возможной радиоактивности композиционных материалов, используемых в бытовой и аэрокосмической

отраслях. Проведенный анализ не обнаружил следов радиоактивного загрязнения данных материалов, что

опровергает распространенное предположение об их радиоактивной природе.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Апкарян, А. С. Чрезвычайные ситуации техногенного характера : учебное пособие для вузов / А. С. Апкарян. – Москва : Издательство Юрайт, 2025. – 60 с.
2. Бессонов, А. С. Радиоизотопные источники энергии в авиации и космонавтике / А. С. Бессонов. – Москва : Издательство Энергоатомиздат, 2010. – 256 с. – ISBN 978-5-283-12345-6.
3. Бодров, А. В. Ядерные энергодвигательные установки для космических аппаратов / А. В. Бодров, С. Д. Гришин, А. С. Коротеев // Космическая техника и технологии. – 2020. – № 4 (31). – С. 45–56.
4. Лиоу, К.-Н. Основы радиационных процессов в атмосфере / пер. с англ. под ред. К. Я. Кондратьева. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1984. – 392 с
5. Козлов, М. С. Авиационные приборы и навигационные системы : материалы лекций / М. С. Козлов, В. Г. Монахов, М. Д. Потопов. – Москва : Высшая школа, 1976. – 248 с.
6. Требования к радиационной безопасности: санитарные нормы и правила. – Минск : Министерство здравоохранения Республики Беларусь, 2012. – 52 с.
7. Kargar, F. Graphene composites with dual functionality: electromagnetic interference shielding and thermal management / F. Kargar, Z. Barani, M. G. Balinskiy, A. S. Magana, J. S. Lewis, A. A. Balandin // Advanced Electronic Materials. – 2019. – Vol. 5, Issue 1. – DOI: 10.1002/aelm.201800558.
8. Михайлова, И. Н. Динамика аккумуляции тяжелых металлов в талломах эпифитного лишайника Hypogymnia Physodes / И. Н. Михайлова, И. П. Шарунова // Экология. – 2008. – № 5. – С. 366–372..

#### REFERENCES

1. Apkar'yan A.S. Chrezvychainye situatsii tekhnogenogo kharaktera: uchebnoe posobie dlya vuzov [Man-made Emergencies: A Textbook for Universities]. Moscow, Yurait Publishing House, 2025, 60 p. (in Russian).
2. Bessonov A.S. Radioizotopnye istochniki energii v aviatsii i kosmonavtike [Radioisotope Power Sources in Aviation and Cosmonautics], Moscow, Energoatomizdat Publishing House, 2010, 256 p. (in Russian). ISBN 978-5-283-12345-6.
3. Bodrov A.V., Grishin S.D., Koroteev A.S. Yadernye energodvigatel'nye ustanovki dlya kosmicheskikh apparatov [Nuclear Power Propulsion Systems for Spacecraft]. Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii [Space Engineering and Technology], 2020, no. 4 (31), pp. 45-56. (in Russian).
4. Liou K.-N. Osnovy radiatsionnykh protsessov v atmosfere [Fundamentals of Radiation Processes in the Atmosphere]. Ed. by K. Ya. Kondrat'ev. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1984, 392 p. (in Russian).
5. Kozlov M.S., Monakhov V.G., Potapov M.D. Aviatsionnye pribory i navigatsionnye sistemy: materialy lektzii [Aircraft Instruments and Navigation Systems: Lecture Materials]. Moscow, Vysshaya shkola, 1976, 248 p. (in Russian).
6. Trebovaniya k radiatsionnoi bezopasnosti: sanitarnye normy i pravila [Radiation Safety Requirements: Sanitary Norms and Rules]. Minsk, Ministry of Health of the Republic of Belarus, 2012, 52 p. (in Russian).
7. Kargar F., Barani Z., Balinskiy M.G., Magana A.S., Lewis J.S., Balandin A.A. Graphene composites with dual functionality: electromagnetic interference shielding and thermal management. Advanced Electronic Materials, 2019, vol. 5, issue 1. DOI: 10.1002/aelm.201800558.
8. Mikhailova I.N., Sharunova I.P. Dinamika akkumulyatsii tyazhelykh metallov v talloмах epifitnogo lishainika Hypogymnia Physodes [Dynamics of Heavy Metal Accumulation in the Thalli of the Epiphytic Lichen Hypogymnia Physodes]. Ekologiya [Ecology], 2008, no. 5, pp. 366 – 372 (in Russian).

*Статья поступила в редакцию  
01.08.2025*

УДК 662.71

В. П. ГОЛУБЕВ, Н. Е. ШЕВЧИК, Д. В. ДЕГТЕРОВ, А. Н. АСАДЧИЙ, М. В. МАЛЬКО,  
С. В. ВАСИЛЕВИЧ, С. О. СТОЙКО

V. GOLUBEV, N. SHEVCHIK, D. DEGTEROV, A. ASADCHY, M. MALKO, S. VASILEVICH, S. STOIKO

# ОБОРУДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ АВИАЦИОННОЙ ОТРАСЛИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СВЧ-ТЕХНОЛОГИИ

## MICROWAVE-ASSISTED THERMAL CONVERSION EQUIPMENT FOR ORGANIC WASTE GENERATED IN THE AVIATION INDUSTRY

**Голубев Виктор Петрович** – кандидат биологических наук, заведующий сектором Технологии утилизации отходов Института энергетики НАН Беларуси, Республика Беларусь

**Шевчик Николай Евгеньевич** – кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе и проектированию Института энергетики НАН Беларуси, Республика Беларусь

**Дегтеров Дмитрий Валентинович** – заведующий сектором биоэнергетики Института энергетики НАН Беларуси, Республика Беларусь

**Асадчий Андрей Николаевич** – старший научный сотрудник сектора биоэнергетики Института энергетики НАН Беларуси, Республика Беларусь

**Малько Михаил Владимирович** – кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник сектора биоэнергетики Института энергетики НАН Беларуси, Республика Беларусь

**Василевич Сергей Владимирович** – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник сектора научных исследований авиационного научно-технического центра учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь  
svasilevich@yandex.by

**Стойко Сергей Олегович** – начальник авиационного научно-технического центра учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь  
sergey\_14\_95@mail.ru

**Viktor Golubev** – Candidate of Biological Sciences, Head of the Waste Utilization Technology Sector, Institute of Energy of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus

**Nikolai Shevchik** – Candidate of Technical Sciences, Deputy Director for Research and Design, Institute of Energy of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus

**Dmitry Degterov** – Head of the Bioenergy Sector, Institute of Energy of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus

**Andrei Asadchy** – Senior Researcher, Bioenergy Sector, Institute of Energy of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus

**Mikhail Malko** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher of the Bioenergy Sector, Institute of Energy of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus

**Sergey Vasilevich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher of the Research Sector of the Aviation Scientific and Technical Center of the Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus  
svasilevich@yandex.by

**Sergey Stoiko** – Head of the Aviation Scientific and Technical Center of the Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus  
sergey\_14\_95@mail.ru

**Аннотация:** в настоящее время одним из приоритетных направлений развития химических технологий в Республике Беларусь является физико-химическая переработка различных органических материалов, включая отходы. О значительном интересе к процессу термического разложения органического материала говорит тот факт, что за последние 15 лет в различных странах мира было разработано около 1000 проектов пиролизических установок различной мощности. Данная проблема является актуальной практически для всех отраслей народного хозяйства, в том числе и для авиации, так как авиация (прежде всего гражданская, с огромным числом аэропортов, принимающих, обслуживающих и отправляющих в новые рейсы большое количество воздушных судов) является крупнейшим в мире собирателем и накопителем веществ и материалов, являющихся возможными носителями болезней и подлежащих немедленному уничтожению. Поэтому необходимо создание новых и модернизация старых технологий и оборудования для эффективной утилизации вредных отходов, используемых в авиации.

**Ключевые слова:** СВЧ-излучения, термическая конверсия, продукты пиролиза, органические отходы.

**Abstract:** at present, one of the priority areas in the development of chemical technologies in the Republic of Belarus is the physicochemical processing of various organic materials, including waste. The considerable interest in the thermal decomposition of organic matter is evidenced by the fact that over the past 15 years, approximately 1,000 pyrolysis plant projects of varying capacities have been developed in different countries around the world. This issue is highly relevant across virtually all sectors of the national economy, including aviation. Aviation – especially civil aviation, with its vast network of airports receiving, servicing, and dispatching a large number of aircraft – acts as one of the largest global accumulators of substances and materials that may serve as potential carriers of diseases and require immediate destruction. Consequently, there is an urgent need to develop new technologies and modernize existing ones, including equipment, to ensure the efficient disposal of hazardous aviation-related waste.

**Keywords:** microwave radiation, thermal conversion, pyrolysis products, organic waste.

## Введение

В настоящее время в аэрокосмической, авиационной, машиностроительной и строительной отраслях наблюдается значительный рост производства изделий из полимеров. Авиационная отрасль является активным потребителем одноразовых полимерных изделий (одноразовая посуда, упаковка и др.) и полимерных композиционных материалов (ПКМ). Большинство ПКМ и полимерных материалов отправляется на свалки. Это привело к значительным экологическим проблемам, включая загрязнение окружающей среды, истощение ресурсов и проблемы утилизации отходов [1, 2]. Ожидается, что к 2050 году производство полимеров достигнет 1,12 млрд тонн [3].

По ряду причин существующие в настоящее время в Российской Федерации и Республике Беларусь методы переработки полимеров не всегда эффективны, обеспечивая получение целевого продукта на сумму около 5 % стоимости исходного сырья. Около 100 миллиардов долларов, или почти 95 % стоимости пластиковых материалов, теряется при однократном использовании, а 50 миллионов тонн пластиковых отходов ежегодно сбрасываются на свалки и в океан [3].

Одним из перспективных методов переработки органических отходов является их термоконверсия с применением СВЧ-технологий, позволяющих достигать температур порядка 1300 °С, что способствует более эффективному разложению ПКМ, чем при традиционных методах.

Исследования по переработке органических материалов в условиях воздействия СВЧ-излучения активно ведутся на протяжении нескольких десятилетий, однако промышленного оборудования с использованием СВЧ-технологий в настоящее время нет. Это связано с необходимостью решения, с одной стороны, задач оптимизации многопараметрического процесса фрагментации органического вещества сложной структуры при СВЧ-воздействии, с другой — ряда инженерно-технических проблем, возникающих при разработке сложной электродинамической системы реактора и ее эксплуатации в условиях использования СВЧ-излучения высокой частоты с учетом специфики различных видов органического вещества.

Конструктивные решения предлагаемых в настоящее время СВЧ-установок не позволяют осуществить их масштабирование до реакторов большой загрузки и высокой мощности, необходимых для промышленного применения.

Исследованию воздействия микроволнового излучения на органические вещества, разработке пиролитических реакторов и технологий разложения биомассы посвящены работы зарубежных и отечественных ученых, таких как Элеанор Р. Биннер, Куан Бу, Ченгвэй Куи, Р. Б. Табакаев и др.

В последние годы СВЧ-излучение все чаще применяется во мно-

гих отраслях народного хозяйства [4–7], различных химических технологиях [11–14], технологических приложениях [8–10], пищевой промышленности [15–17], медицине [18, 19]. Большое число инновационных предложений в науке и технике связано с новыми СВЧ-технологиями.

## Основная часть

В Институте энергетики НАН Беларуси разработана экспериментальная пиролитическая установка и технологии переработки органических материалов с получением различных целевых продуктов (древесного угля, генераторного газа), позволяющие проводить эксперименты как в присутствии СВЧ-излучения, так и без него. На рисунках 1 и 2 показаны общий вид и функциональная схема экспериментальной пиролитической установки, реализующей разработанные технологии.

Установка представляет собой устройство, состоящее из нескольких основных функциональных блоков:

- блока получения генераторного газа (включает в себя топочное устройство с бункером подачи измельченного топлива);
- блока пироллиза (устройство получения пирогазов) с трубчатыми электронагревателями (ТЭН), СВЧ-излучателями и устройством подачи инертного газа;
- блока дожига (камера смешивания и дожига смеси генераторного и пирогазов) с системой охлаждения;
- системы теплоснабжения, системы газоходов, дымососа.

Обозначения схем движения газовых потоков, указанных на рисунке 2, при работе установки, представлены на рисунке 3.

Оборудование термохимической конверсии (см. рисунок 1) условно поделена на следующие блоки:

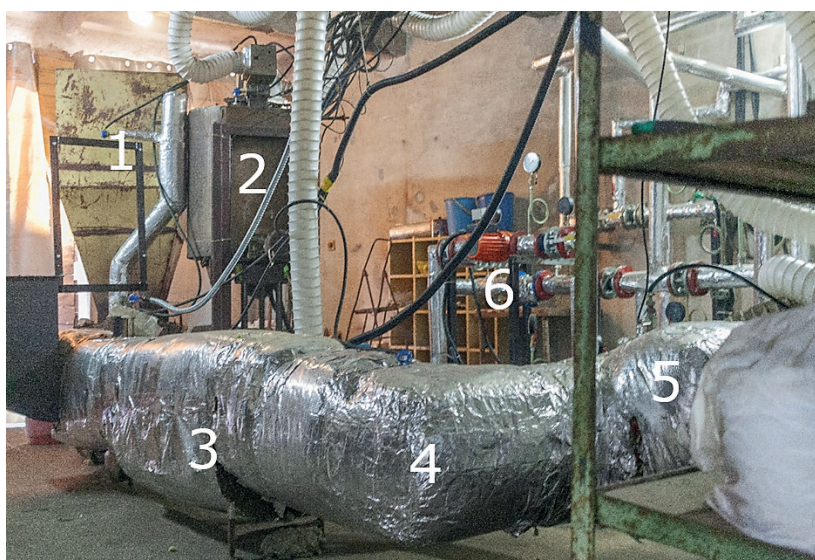


Рисунок 1 — Общий вид установки:

- 1 – блок получения генераторного газа; 2 – блок пироллиза (реактор);
- 3 – блок дожига; 4 – блок регулирования температуры продуктов горения до оптимальных значений для подачи на теплообменник;
- 5 – теплообменник с байпасной линией и устройством сорбционной очистки дымовых газов; 6 – система теплоснабжения

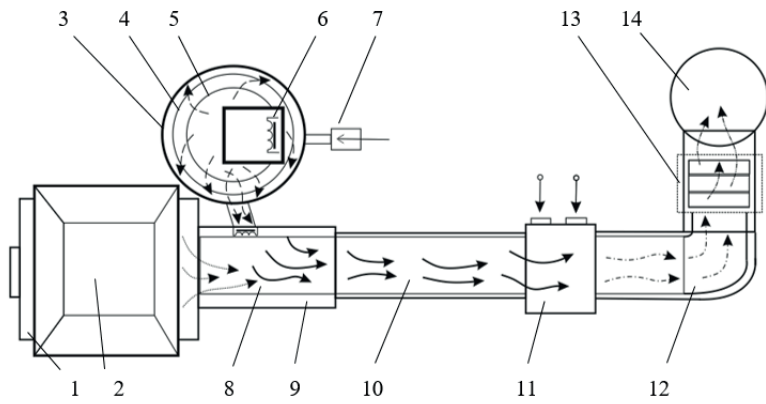


Рисунок 2 – Функциональная схема установки:

- 1 – топка газогенератора; 2 – бункер загрузки биомассы; 3 – реактор;
- 4 – внутренний стакан реактора (барaban); 5 – реторта;
- 6 – СВЧ-излучатель; 7 – устройство подачи инертного газа;
- 8 – камера дожига (смесительная часть); 9 – теплоизоляционный экран;
- 10 – камера дожига (основная часть); 11 – блок воздушного охлаждения с фильтрацией охлаждающего воздуха; 12 – камера дожига (хвостовая часть); 13 – теплообменный узел с байпасной линией сорбционной очистки дымовых газов; 14 – дымовая труба с дымососом

- блок 1 получения генераторного газа – газогенератор для сжигания сыпучего топлива, например, древесной щепы, представляет собой топку с установленным сверху бункером подачи биомассы. При горении биомассы в камере топки образуется генераторный газ, который смешивается с пиролизным газом, образующимся в реакторе. Полученная смесь сгорает в камере дожига блока дожига 3;

- блок 2 пиролиза древесины включает в себя камеру реактора, оборудованную ТЭНами и устройством создания СВЧ, загрузочную платформу с вращающимся дном и реторту;

- блок дожига 3 газовой смеси включает в себя устройство смешивания генераторного газа и пирогаза для обеспечения равномерного горения смеси газов. Конструкция камеры дожига обеспечивает равномерное сгорание газовой смеси при эффективном ее охлаждении;

- блок 4 регулирования температуры продуктов горения до оптимальных значений для подачи на теплообменник представляет собой систему воздушного охлаждения горючих газов и обеспечивает их эффективное охлаждение. На выходе из камеры дожига установлен теплообменник 6 системы теплоснабжения производственного объекта;

- выброс дымовых газов, проходящих через рекуперативный теплообменник 5 в системы те-

- > пиролизный газ
- .....> генераторный газ
- > смесь пиро- и генераторного газа
- - - - -> охлажденная смесь продуктов горения
- > очищенная смесь продуктов горения
- > инертный газ
- > воздух системы охлаждения

Рисунок 3 – Обозначение схем движения газовых потоков

плоснабжения 6, производится дымососом с дымовой трубой. Управление и контроль за работой экспериментальной установки осуществляется с рабочего места оператора.

В технологии производства древесного угля, предварительно взвешенная древесина загружается в реторту (рисунок 4, а). В технологии получения высококалорийного газообразного топлива в реторту загружается RDF-топливо из различных отходов (рисунок 4, б). Реторта устанавливается на загрузочную платформу и помещается в рабочую камеру реактора. На рисунке 4, а представлен процесс загрузки реторты в камеру реактора.

Нагрев реторты с сырьем осуществляется по заданной программе (с учетом температуры и скорости нагрева пиролизуемого сырья). В процессе пиролиза производилось снятие данных значений температур в основных точках замера:

температуры нагрева ТЭНов, газов в камере блока пиролиза (внутри реактора), пирогазов, выходящих из реактора, горения генераторных газов в топке, смеси генераторных газов и пирогазов в камере дожига. Техпроцесс может проводиться как с использованием СВЧ-излучения, так и без него. После окончания технологического процесса получения древесного угля производится его прокалка, затем подача инертного газа ( $CO_2$ ) для вытеснения горючих газов из рабочей камеры блока пиролиза, дальнейшего остывания готового продукта и его стабилизации.

Целью работы при отработке технологии получения древесного угля являлось исследование процесса пиролиза органического материала (древесины) при воздействии СВЧ. В данной серии экспериментов в качестве генераторного газа использовали смесь пропан-бутан. Температура горения смеси пропан-бутан постоянна, что позволяет создать устойчивые реперные точки для определения вклада пирогаза в суммарную температуру горения смеси пропан-бутан и пирогаза.



а

б

Рисунок 4 – Реторта, установленная на загрузочную платформу

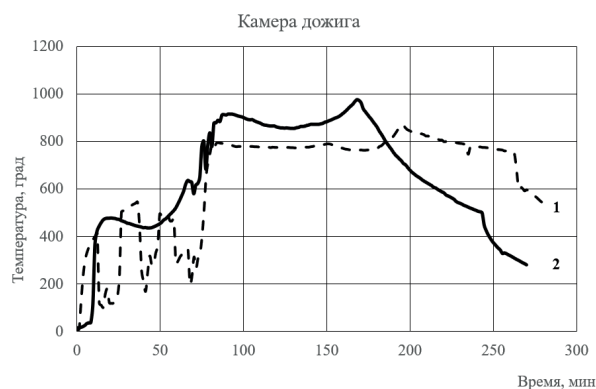


Рисунок 5 — Зависимость температуры нагрева рабочей среды от времени в камере дожига в отсутствии (1) и в присутствии (2) сверхвысокочастотного электромагнитного поля

На рисунке 5 представлена зависимость температуры горения пирогазов от времени пиролиза в присутствии и отсутствии СВЧ.

Полученные данные свидетельствуют о том, что в присутствии СВЧ-излучения начальный этап пиролиза характеризуется отсутствием резких перепадов температур, способствует прохождению одновременно всех процессов эндотермической стадии пиролиза, что и выравнивает график температур. При этом в процессе работы температура горения в камере дожига достигает 1000 °С, что способствует эффективному дожигу газовой смеси. Время экзотермической стадии с СВЧ меньше, чем аналогичной стадии без СВЧ. Стадия прокалики также сопровождается более быстрым снижением температуры.

Эти данные однозначно свидетельствуют о более высокой скорости пиролиза древесины и высокой температуре дожига газовой смеси в присутствии СВЧ.

В ходе отработки технологии были получены образцы древесного угля при включенных и выключенных устройствах создания СВЧ. Масса загрузки ре-

торты составила около 31 кг (31,0 кг в отсутствии СВЧ и 31,7 кг в присутствии СВЧ). Относительный массовый выход древесного угля при отсутствии СВЧ составил около 22,9 % (масса угля составила 7,1 кг). При наличии СВЧ относительный массовый выход составил 24,6 % (масса угля составила 7,8 кг). При этом время процесса в присутствии СВЧ на 10 % меньше, чем в отсутствии СВЧ. Соответственно, производительность пиролизной установки при отсутствии СВЧ составила 1,42 кг/ч, а в присутствии СВЧ — 1,73 кг/ч, увеличение на 22 %.

В таблице 1 показаны основные характеристики полученных твердых продуктов. Указанные характеристики соответствуют требованиям для древесного угля марки А.

Все вышесказанное указывает на то, что использование предлагаемого устройства с включенным режимом генерации СВЧ позволяет повысить интенсивность дожига газовой смеси за счет достижения более высоких температур в камере дожига, увеличить производительность процесса получения древесного угля за счет снижения времени прокалики и повышения качества получаемого угля за счет отсутствия резких изменений температуры в реакторе.

На основе предварительного анализа структуры и морфологии твердофазного продукта микроволнового пиролиза древесины наблюдаются существенные различия в его составе. При СВЧ-обработке углеродистый остаток обладает более развитой поверхностью, сорбционной емкостью и более высокой пористостью.

При отработке технологии получения высококалорийного газообразного топлива из отходов был проведен анализ широкого спектра различных отходов, способных поглощать энергию сверхвысокочастотного электромагнитного поля. В результате исследований в качестве оптимального вида отхода для получения RDF-топлива из высокообводненных отходов был выбран текстильный корд, образующийся в процессе переработки автомобильных шин. Этот отход имеет волокнистую структуру, что позволяет формировать более прочную трехмерную структуру топливных элементов. По своему химическому составу он представляет собой смесь искусственных полимерных молекул, которые имеют более высокую теплотворную способность по сравнению с мездрой и опилками. Это свойство будет увеличивать общую теплотворную способность получаемого RDF-топлива.

За поглощение энергии СВЧ отвечают примеси неорганических материалов в текстильном корде, в основном железные опилки. В отличие от органических веществ, неорганические вещества не подвержены термохимическому пиролизу. В процессе распада высокомолекулярных соединений и удаления газообразных продуктов из камеры пиролиза концентрация неорганических веществ возрастает, что приводит к большему поглощению энергии СВЧ на единицу объема RDF-топлива

Таблица 1 — Основные характеристики полученных образцов угля

	Удельная энергия сгорания, кДж/кг	Зольность, %	Содержание химических элементов, %		Относительный массовый выход, %
В отсутствии СВЧ	30435,31	1,26	C	93,76	22,9
			O	4,71	
			Al	0,03	
			K	0,67	
			Ca	0,50	
			Cu	0,14	
В присутствии СВЧ	32066,77	1,12	C	92,15	24,6
			O	6,08	
			Si	0,06	
			Al	0,07	
			K	0,05	
			Ca	0,65	
			Cu	0,61	

и более интенсивному выделению высококалорийных газообразных продуктов в единицу времени.

Сравнительный анализ выделяемых газообразных продуктов пиролиза из RDF-топлива, полученного из мездры (45 %), опилок (45 %) и текстильного корда (10 %), в присутствии и отсутствии СВЧ представлен на рисунке 6.

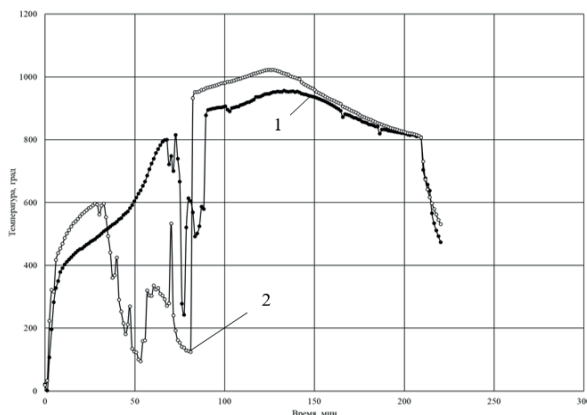


Рисунок 6 — Результаты сравнения температур горения генераторного газа и пирогаза в камере дожигания в присутствии и отсутствии сверхвысокочастотного электромагнитного поля:  
1 — без использования СВЧ,  
2 — с использованием СВЧ

Полученные результаты показывают, что СВЧ быстрее «досушивает» топливные элементы и начинает процесс пиролиза. Причем, по изменению температур можно утверждать, что сверхвысокочастотное электромагнитное поле более детально выявляет отдельные фракции пирогазов. После более быстрого удаления

негорючих фракций пирогазов сверхвысокочастотное электромагнитное поле обеспечивает более раннее начало пиролиза. Причем позволяет получать пирогаз, который по своей калорийности превосходит пирогаз, образующийся в отсутствие СВЧ.

Следовательно, сверхвысокочастотное электромагнитное поле может быть использовано для получения высококалорийных газообразных продуктов пиролиза из многокомпонентных полимерных органических материалов с добавлением неорганических компонентов, поглощающих энергию СВЧ.

### Заключение

В результате проведенных исследований установлены основные принципы получения RDF-топлива из отходов (включая высокообводненные отходы), которые обеспечивают получение высококалорийного газообразного топлива под действием СВЧ.

Разработанная экспериментальная установка в ходе проведенных экспериментов позволила протестировать основные элементы конструкции (реактор, камеру дожигания, системы охлаждения и очистки дымовых газов), а также осуществить отработку различных технологий получения продуктов конверсии, что свидетельствует о высоком потенциале дальнейших научных исследований. По результатам проведенной работы подан патент на изобретение № а 20250017 «Пиролизная установка для производства древесного угля».

В целом, переработка органического сырья с использованием СВЧ-излучения является перспективным направлением, которое может способствовать более эффективному использованию ресурсов и снижению негативного воздействия на окружающую среду.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Allahvaisi, S. Polypropylene in the industry of food packaging / S. Allahvaisi. – UK, 2012. – P. 978–953.
- Bayer, FL. Polyethylene terephthalate recycling for food-contact applications: testing, safety and technologies: a global perspective / FL. Bayer // Food Addit Contam. – 2002. – № 19(S1). – P. 111–134.
- Hong, M. Chemically recyclable polymers: a circular economy approach to sustainability / M. Hong, EY-X. Chen // Green Chem. – 2017. – № 19(16). – P. 3692–3706.
- Московский, М. Н. Применение СВЧ энергии в различных областях сельского хозяйства / М. Н. Московский, В. И. Пахомов // Научные известия на научно-техническом съезде по машиностроению. – 2013. – Т. 21 – № 5 (142). – С. 35–36.
- A perspective on biomass-derived biofuels: From catalyst design principles to fuel properties / Y. Kim [et al.] // Journal of Hazardous Materials. – 2020. – V. 400. – P. 123198.
- Yin, Ch. Microwave-assisted pyrolysis of biomass for liquid biofuels production / Ch. Yin // Bioresource Technology. – 2012. – V. 120. – P. 273–284.
- Motamedi, F. A review on the microwave-assisted pyrolysis technique / F. Motamedi, M. T. Afzal // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2013. – V. 28. – P. 317–330.
- Wang, Y. A review of bio-oil production from sewage sludge / Y. Wang, G.Y. Chen // Advanced Materials Research. – 2014. – V. 864–867. – P. 1909–1918.
- Mushtaq, F. A review on microwave assisted pyrolysis of coal and biomass for fuel production / F. Mushtaq, R. Mat, F. Nasir Ani // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – V. 39. – P. 555–574.
- Utilization of petroleum residues under microwave irradiation / M. V. Tsodikov [et al.] // Chemical Engineering Journal. – 2016. – V. 292. – P. 315–320.
- Sustainable biofuel and bioenergy production from biomass waste residues using microwave-assisted heating: A comprehensive review / A. A. Arpia [et al.] // Chemical Engineering Journal. – 2021. – V. 403.
- Khan, N.R. Microwave mediated lipase-catalyzed synthesis of n-butyl palmitate and thermodynamic studies / N. R. Khan, V.K. Rathod // Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. – 2020. – V. 29. – P. 420–426.
- Accelerated microwave curing of fibre-reinforced thermoset polymer composites for structural applications: A review of scientific challenges, Composites Part A / C. O. Mgbemena [et al.] // Applied Science and Manufacturing. – 2018. – V. 115. – P. 88–103.
- Опыт применения энергии микроволн в горном деле / Д. Л. Рахманкулов [и др.] // Башкирский химический журнал. – 2008. – № 2. – С. 114.
- Белов, А. А. Способ обеззараживания зерна в электромагнитном поле сверхвысокой частоты. / А. А. Белов, А. Н. Коробков // Вестник НГИЭИ. – 2015. – № 2. – С. 5.
- Галоненков, И. А. СВЧ-обработка осадков сточных вод пищевых производств. / И. А. Галоненков, О. А. Федорова // Вестник МГТУ. – 2013. – № 4. – С. 681.
- Рахманкулов, Д. Л. Микроволновое обеззараживание нефти и нефтепродуктов. / Д. Л. Рахманкулов, С. Ю. Шавшукова, И. Н. Вихарева // Баш. хим. ж. – 2008. – № 3. – С. 163.
- Загайнов, В. Е. Новый метод термического разрушения опухолей печени локальным воздействием энергии СВЧ. / В. Е. Загайнов // Соврем. технологии в медицине. – 2010. – № 3. – С. 6.
- Рахманкулов, Д. Л. Применение микроволнового излучения в терапии некоторых заболеваний / Д. Л. Рахманкулов, С. Ю. Шавшукова, И. Н. Вихарева // Башкирский химический журнал. – 2008. – № 2. – С. 94.

### REFERENCES

- Allahvaisi S. Polypropylene in the food packaging industry. 2012, pp. 978-953.
- Bayer FL. Polyethylene terephthalate recycling for food-contact applications: testing, safety, and technologies: a global perspective. Food Addit Contam, 2002, 19(S1), pp.111-134.
- Hong M, Chen EY-X. Chemically recyclable polymers: a circular economy approach to sustainability. Green Chem, 2017, 19 (16), pp. 3692-3706.
- Moskovsky M.N. Application of microwave energy in various fields of agriculture. Scientific news on the scientific and technical union in mechanical engineering, 2013, Vol. 21, No. 5 (142), pp. 35-36.

5. Kim Y. A perspective on biomass-derived biofuels: From catalyst design principles to fuel properties. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, V. 400, pp. 123198.
6. Yin Ch. Microwave-assisted pyrolysis of biomass for liquid biofuels production. *Bioresource Technology*, 2012, V. 120, pp. 273-284.
7. Motasemi F. A review on the microwave-assisted pyrolysis technique. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, V. 28, pp. 317-330.
8. Wang Y. A review of bio-oil production from sewage sludge. *Advanced Materials Research*, 2014, V. 864-867, pp. 1909-1918.
9. Mushtaq F. A review on microwave assisted pyrolysis of coal and biomass for fuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, V. 39, pp. 555-574.
10. Tsodikov M.V. Utilization of petroleum residues under microwave irradiation. *Chemical Engineering Journal*, 2016, V. 292, pp. 315-320.
11. Arpia A.A. Sustainable biofuel and bioenergy production from biomass residue wastes using microwave-assisted heating: A comprehensive review. *Chemical Engineering Journal*, 2021, V. 403.
12. Khan N.R. Microwave mediated lipase-catalyzed synthesis of n-butyl palmitate and thermodynamic studies. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2020, V. 29.
13. Mgbemena C.O. Accelerated microwave curing of fiber-reinforced thermoset polymer composites for structural applications: A review of scientific challenges, *Composites Part A. Applied Science and Manufacturing*, 2018, V. 115, pp. 88-103.
14. Rakhmankulov D.L. Experience in using microwave energy in mining. *Bashkir Chemical Journal*, 2008, No. 2, pp. 114.
15. Belov A.A. Method for disinfecting grain in an ultrahigh-frequency electromagnetic field. *Bulletin of NGIEI*, 2015, № 2, pp. 5.
16. Gaponenkov I.A. Microwave treatment of wastewater sludge from food production. *Bulletin of Moscow State Technical University*, 2013, № 4, pp. 681.
17. Rakhmankulov D.L. Microwave disinfection of oil and oil products. *Bashkir Chemical Journal*, 2008, № 3, pp. 163.
18. Zagaynov V.E. New method of thermal destruction of liver tumors by local action of microwave energy. *Sovrem. technol. med.*, 2010, № 3, pp. 6.
19. Rakhmankulov D.L. Application of microwave radiation in the therapy of some diseases. *Bashkir Chemical Journal*, 2008, № 2, pp. 94.

*Статья поступила в редакцию  
06.08.2025*

УДК 623.4.018

П. В. ИВАНИШИН, А. А. САНЬКО, М. А. БАСОВ, Е. Л. РУСАКОВИЧ, В. А. ПОТАПОВ

P. IVANISHIN, A. SANKO, M. BASOV, E. RUSAKOVICH, V. POTAPOV

# АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ ДАТЧИКОВ БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА ТОЧНОСТЬ НАВЕДЕНИЯ ВЫСОКОДИНАМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

## ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF INSTRUMENTAL MEASUREMENT ERRORS OF SENSORS OF A STRAPBACK INERTIAL NAVIGATION SYSTEM ON THE ACCURACY OF GUIDANCE OF A HIGHLY DYNAMIC OBJECT

**Иванишин Павел Валерьевич** – кандидат технических наук, доцент, начальник научно-исследовательского отдела научно-технического центра Республиканского производственного унитарного предприятия «Завод точной электромеханики», Республика Беларусь  
p.ivanishin@ztem.by

**Pavel Ivanishin** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Research Department of the Scientific and Technical Center of the Republican Production Unitary Enterprise Precision Electromechanics Plant, Republic of Belarus  
p.ivanishin@ztem.by

**Санько Андрей Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Республиканского производственного унитарного предприятия «Завод точной электромеханики», Республика Беларусь  
a.sanko@ztem.by

**Andrey Sanko** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher at the Republican Production Unitary Enterprise Precision Electromechanics Plant, Republic of Belarus  
a.sanko@ztem.by

**Басов Максим Андреевич** – инженер-исследователь Республиканского производственного унитарного предприятия «Завод точной электромеханики», Республика Беларусь  
m.basov@ztem.by

**Maksim Basov** – Research Engineer of the Republican Production Unitary Enterprise Precision Electromechanics Plant, Republic of Belarus  
m.basov@ztem.by

**Русакович Екатерина Леонидовна** – магистр технических наук, старший инженер кафедры воздушных судов и авиационного оборудования учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь  
ekaterina2011715@icloud.com

**Ekaterina Rusakovich** – Master of Technical Sciences, Senior Engineer of the Department of Aircraft and Aviation Equipment of the Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus  
ekaterina2011715@icloud.com

**Потапов Вячеслав Александрович** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь  
potapstark@gmail.com

**Vyacheslav Potapov** – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher at the Scientific research Laboratory of the Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus  
potapstark@gmail.com

**Аннотация:** представлены результаты анализа влияния погрешностей бесплатформенной инерциальной навигационной системы, зависящих от температуры, на точность наведения высокодинамического объекта. В качестве высокодинамического объекта моделировался один из классов управляемого реактивного снаряда, перемещающийся по баллистической траектории. Для оценки влияния погрешностей измерений, которые зависят от температуры, датчиков бесплатформенной инерциальной навигационной системы на точность наведения объекта, использовался метод Монте-Карло. Анализ результатов исследований показал, что температурные смещения нулей датчиков оказывают более значительное влияние на круговую ошибку, чем неортогональность их осей. Предложен алгоритм температурной компенсации погрешностей бесплатформенной инерциальной навигационной системы, позволяющей существенно повысить точность наведения объекта.  
**Ключевые слова:** управляемый реактивный снаряд, метод Монте-Карло, температурная зависимость погрешностей, алгоритмы компенсации, точность наведения.

**Abstract:** the results of research on the analysis of the effect of temperature-dependent errors of a strapback inertial navigation system on the accuracy of guidance of a highly dynamic object are presented. One of the classes of a guided

missile moving along a ballistic trajectory was modeled as a highly dynamic object. The Monte Carlo method was used to assess the effect of measurement errors of sensors of a strapback inertial navigation system, which depend on temperature, on the accuracy of object guidance. An analysis of the research results showed that the temperature shifts of the sensor zeros have a more significant effect on the circular error than the non-orthogonality of their axes. An algorithm for temperature compensation of errors of a strapless inertial navigation system is proposed, which makes it possible to significantly improve the accuracy of object guidance.

**Keywords:** guided missile, Monte Carlo method, temperature dependence of errors, compensation algorithms, guidance accuracy.

## Введение

Основной приборного комплекса, решающего задачу навигации в инерциальном режиме управляемого реактивного снаряда (УРС), в настоящее время являются бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС). Калибровка датчиков БИНС представляет собой задачу определения параметров априорно введенной модели инструментальных погрешностей измерений с целью последующей компенсации погрешностей измерений в режиме навигации. Эта модель включает в себя: смещения нулевых сигналов акселерометров и датчиков угловой скорости (ДУС), малые углы неортогональности осей датчиков, погрешности масштабных коэффициентов, зависимости инструментальных погрешностей от температуры и собственные шумы измерений. Вопросам калибровки датчиков БИНС посвящен ряд работ [1, 4–7], однако вопросы влияния инструментальных погрешностей, зависящих от температуры, датчиков БИНС на точность наведения высокодинамического объекта, летящего по баллистической траектории, рассмотрены не были.

## Постановка задачи

Разработать модель инструментальных погрешностей измерений датчиков БИНС; провести анализ влияния погрешностей БИНС, зависящих от температуры, на точность наведения высокодинамического объекта и разработать алгоритм их компенсации.

## Решение задачи

*Модель выходных сигналов акселерометра.* Выходной сигнал микроэлектромеханической системы (МЭМС) акселерометра 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. В общем случае эталонная линейная модель выходных сигналов трехосного акселерометра имеет следующий вид [1–2]:

$$\begin{bmatrix} U_{out_{ax}} \\ U_{out_{ay}} \\ U_{out_{az}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 \\ 0 & 0 & K_z \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}. \quad (1)$$

С учетом наличия смещения нулей акселерометров и шумов

$$\begin{bmatrix} U_{out_{ax}} \\ U_{out_{ay}} \\ U_{out_{az}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 \\ 0 & 0 & K_z \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{x0} \\ U_{y0} \\ U_{z0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $K_x, K_y, K_z$  – масштабные коэффициенты каждого из акселерометров;

$a_x, a_y, a_z$  – значения кажущихся ускорений УРС относительно базовых осей БИНС;

$U_{x0}, U_{y0}, U_{z0}$  – смещения нулей акселерометров;

$n_x, n_y, n_z$  – шумы измерения.

Зададим углами  $L$  неортогональности осей чувствительности датчиков БИНС. Положение осей чувствительности  $O_{x1}, O_{y2}, O_{z3}$  каждого из акселерометров относительно базовых осей БИНС сдвинуты на некоторые углы  $L_{xz}, \dots, L_{zx}$  (рисунок 1).

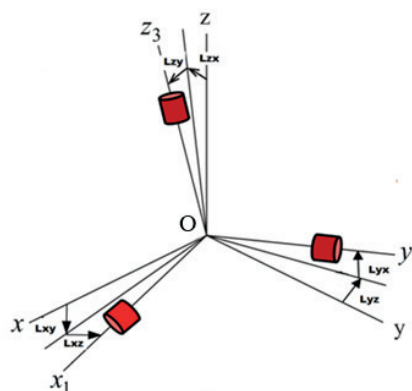


Рисунок 1 – Оси акселерометра

Тогда матрица  $T$ , описывающая неортогональность осей акселерометров, имеет вид

$$T = \begin{bmatrix} \cos L_{xz} \cos L_{xy} & \sin L_{xz} & -\sin L_{xy} \cos L_{xz} \\ -\sin L_{yz} & \cos L_{yx} \cos L_{yz} & \sin L_{yx} \cos L_{yz} \\ \sin L_{zy} & -\sin L_{zx} \cos L_{zy} & \cos L_{zy} \cos L_{zx} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Подставляя выражение (2) в (1), получим модель выходных сигналов трехосного акселерометра:

$$\begin{bmatrix} U_{out_{ax}} \\ U_{out_{ay}} \\ U_{out_{az}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 \\ 0 & 0 & K_z \end{bmatrix} \times T \times \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{x0} \\ U_{y0} \\ U_{z0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix}. \quad (4)$$

*Модель выходных сигналов волоконно-оптического гироскопа (ВОГ).* Эталонный выходной сигнал ВОГ:

$$\begin{bmatrix} U_{out_{gx}} \\ U_{out_{gy}} \\ U_{out_{gz}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_x & 0 & 0 \\ 0 & R_y & 0 \\ 0 & 0 & R_z \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}, \quad (5)$$

с учетом неортогональности его осей, смещения нулей и шумов, можно представить в виде

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} U_{out_{gx}} \\ U_{out_{gy}} \\ U_{out_{gz}} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R_x & 0 & 0 \\ 0 & R_y & 0 \\ 0 & 0 & R_z \end{bmatrix} \times C \times \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} U_{ax0} \\ U_{ay0} \\ U_{az0} \end{bmatrix} + B \times \begin{bmatrix} a_{x1} \\ a_{y2} \\ a_{z3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{ox} \\ n_{oy} \\ n_{oz} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $R_x, R_y, R_z$  – масштабные коэффициенты ДУС;

$C$  – матрица, определяющая перекосы измерительных осей ДУС относительно базовой системы координат;

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$  – значения проекций абсолютной угловой скорости на оси чувствительности гироскопов;

$U_{ax0}, U_{ay0}, U_{az0}$  – смещения нулей ДУС в запуске;

$B$  – матрица чувствительности ДУС к ускорениям, так называемый «дрейф от g»;

$n_{ox}, n_{oy}, n_{oz}$  – шумы измерения.

Матрица  $C$  имеет вид

$$C = B = \begin{bmatrix} \cos G_{xz} \cos G_{xy} & \sin G_{xz} & -\sin G_{xy} \cos G_{xz} \\ -\sin G_{yz} & \cos G_{yx} \cos G_{yz} & \sin G_{yx} \cos G_{yz} \\ \sin G_{zy} & -\sin G_{zx} \cos G_{zy} & \cos G_{zy} \cos G_{zx} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где  $G_{xz}, \dots, G_{zx}$  – малые углы отклонения осей ДУС от базовых осей БИНС, значения которых зависят от температуры.

В таблице 1 представлены усредненные данные по перекосу осей БИНС, полученные в результате натуральных экспериментов при различной температуре.

На рисунке 2 представлены зависимости изменения параметров четырех датчиков блока чувствительных элементов (БЧЭ) от температуры.

Таблица 1 – Перекос осей БИНС

Оси БИНС	При температуре 21 °С	При температуре – 40 °С
$L_{xy}$	0,2420	0,3470
$L_{yx}$	0,2420	0,3480
$L_{zx}$	–0,0280	–0,0420
$L_{xz}$	–0,0200	–0,0350
$L_{yz}$	0,0280	0,0670
$L_{zy}$	0,0340	0,0490
$G_{xy}$	0,2480	0,3560
$G_{yx}$	0,2360	0,3420
$G_{zx}$	–0,0230	–0,0170
$G_{xz}$	–0,0220	0,0230
$G_{yz}$	0,0470	0,0559
$G_{zy}$	0,0470	0,0634

Натурные исследования проводились с использованием трехосевого поворотного стола АСУИТАС модели TES\_US-H\_644-7 с температурной камерой. Как видно из рисунка 2, зависимости по одноименным параметрам по осям измерений от температуры идентичны, но коэффициенты этих функций требуется определять для каждого датчика отдельно.

В общем случае функции температурной калибровки по оси ОХ для:

- масштабных коэффициентов акселерометров и ДУС:

$$\begin{cases} K_x(t_a) = a_{12} \cdot t_a + a_{13}; \\ R_x(t_a) = b_{12} \cdot t_a + b_{13}; \end{cases} \quad (8)$$

- смещения нулей акселерометров и ДУС:

$$\begin{cases} U_{x0}(t_a) = c_{11} \cdot t_a^2 + c_{12} \cdot t_a + c_{13}; \\ U_{ax0}(t_a) = d_{11} \cdot t_a^2 + d_{12} \cdot t_a + d_{13}. \end{cases} \quad (9)$$

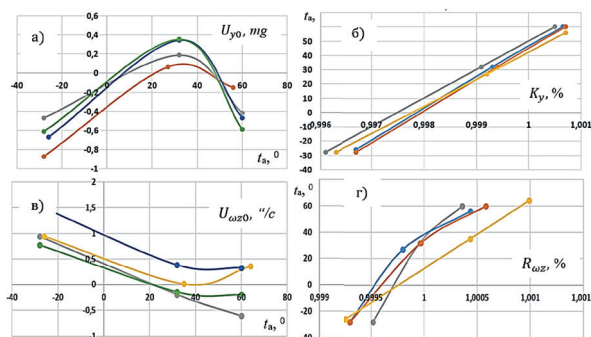


Рисунок 2 – Зависимости изменения параметров четырех однотипных датчиков БЧЭ от температуры

В качестве примера в таблице 2 приведены коэффициенты аппроксимирующих функций температурной калибровки для триады акселерометров и ДУС.

Тогда модели инструментальных погрешностей измерений датчиков БИНС с учетом температурной калибровки имеют вид

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} U_{out_{ax}} \\ U_{out_{ay}} \\ U_{out_{az}} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} K_x(t_a) & 0 & 0 \\ 0 & K_y(t_a) & 0 \\ 0 & 0 & K_z(t_a) \end{bmatrix} \times \\ &\times T \times \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{x0}(t_a) \\ U_{y0}(t_a) \\ U_{z0}(t_a) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} U_{out_{gx}} \\ U_{out_{gy}} \\ U_{out_{gz}} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R_x(t_a) & 0 & 0 \\ 0 & R_y(t_a) & 0 \\ 0 & 0 & R_z(t_a) \end{bmatrix} \times C \times \\ &\times \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{ax0}(t_a) \\ U_{ay0}(t_a) \\ U_{az0}(t_a) \end{bmatrix} + B \times \begin{bmatrix} a_{x1} \\ a_{y2} \\ a_{z3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{ox} \\ n_{oy} \\ n_{oz} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (11)$$

Основной шумовой компонент гироскопов – случайное блуждание угловой скорости  $\sigma_{ARW}$  – представляет собой аддитивный белый шум, являющийся результатом пропуска порога белого шума

Таблица 2 – Коэффициенты аппроксимирующих функций температурной калибровки

Коэффициент	Значение	Коэффициент	Значение	Коэффициент	Значение	Коэффициент	Значение
$a_{11}$	0	$b_{11}$	0	$c_{11}$	0,0001	$d_{11}$	0,0002
$a_{12}$	6e-05	$b_{12}$	1,7899e-05	$c_{12}$	-0,0103	$d_{12}$	-0,0188
$a_{13}$	0,9965	$b_{13}$	0,9988517	$c_{13}$	0,2099	$d_{13}$	0,7031
$a_{21}$	0	$b_{21}$	0	$c_{21}$	-0,0003	$d_{21}$	0,0001
$a_{22}$	5e-05	$b_{22}$	2,3635e-05	$c_{22}$	0,0168	$d_{22}$	-0,0082
$a_{23}$	0,9975	$b_{23}$	0,9986982	$c_{23}$	-0,1778	$d_{23}$	0,0875
$a_{31}$	0	$b_{31}$	0	$c_{31}$	-0,0002	$d_{31}$	0,0003
$a_{32}$	9e-06	$b_{32}$	1,9230e-05	$c_{32}$	-0,006	$d_{32}$	-0,0179
$a_{33}$	0,9998	$b_{33}$	0,9997607	$c_{33}$	0,4919	$d_{33}$	0,2712

через интегратор. Для реализации случайного блуждания задавалось СКО порождающего белого шума при математическом ожидании равном нулю [2]:

$$\sigma_{wn}^{\Gamma} = \sigma_{ARW} \sqrt{T_0 t},$$

где  $\sigma_{ARW} = 0,015, \text{ } ^{\circ}/\sqrt{\text{ч}}$ ;

$T_0$  – период дискретизации белого шума (200 Гц);

$t$  – время моделирования (300 с).

Для акселерометров

$$\sigma_{wn}^a = \sigma_{ARW} \sqrt{T_0 t},$$

где  $\sigma_{ARW} = 40 \cdot 10^{-6}, \text{ g}/\sqrt{\text{ч}}$ .

Формулы для вычисления углового положения изделия:

$$\nu = \arctg \frac{-U_{out_x}}{\sqrt{U_{out_y}^2 + U_{out_z}^2}};$$

$$\gamma = \arctg \left( \frac{U_{out_z}}{U_{out_y}} \right);$$

$$\psi = \frac{U_{out_{gy}} \cos \gamma - U_{out_{gz}} \sin \gamma}{U_{out_{gx}} \cos \nu + U_{out_{gy}} \sin \nu \sin \gamma + U_{out_{gz}} \sin \nu \cos \gamma}.$$

Для компенсации неортогональности осей датчиков и температурных воздействий на значения их выходных сигналов предлагается использовать вычисление произведения обратных матриц:

$$\left. \begin{aligned} U_{out_a} &= U_{out_a} \cdot inv(T) \cdot inv(K(t_a)); \\ U_{out_g} &= U_{out_g} \cdot inv(C) \cdot inv(R(t_a)); \end{aligned} \right\} (12)$$

где  $inv(T)$  – обратная матрица  $T$ .

Для компенсации смещения нулей датчиков предлагается дополнить (12) следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} U_{out_a} &= U_{out_a} \cdot inv(T) \cdot inv(K(t_a)) - U_0(t_a); \\ U_{out_g} &= U_{out_g} \cdot inv(C) \cdot inv(R(t_a)) - U_{o0}(t_a). \end{aligned} \right\} (13)$$

Результаты сравнительного анализа алгоритмов (12) – (13) на точность вычисления углового положения датчиками БИНС представлены в таблице 3. Параметры моделирования:  $\omega_x = -0,125 \text{ град/с}$ ;  $\omega_y = -3,937 \text{ град/с}$ ;  $\omega_z = -0,25 \text{ град/с}$ ;  $a_x = 0,0317 \text{ м/с}^2$ ;  $a_y = -0,056 \text{ м/с}^2$ ;  $a_z = 0,985 \text{ м/с}^2$ .

Анализ результатов (см. таблицу 3) показал, что неортогональность осей датчиков БИНС вносит существенный вклад в ошибку вычисления углового положения объекта (менее 5%). Выполнение коррекции (12) уменьшает ошибку не более чем на угловые секунды. При использовании коррекции с температурной компенсацией дрейфов нулей датчиков (13) ошибки углов ориентации уменьшаются до единиц градусов, и их откорректированные значения составляют не более 3% – 5% от эталонных значений.

В качестве высокодинамического объекта моделировался один из классов УРС, перемещающийся по баллистической траектории с временем полета 250 с. Для проведения оценки точности наведения объ-

Таблица 3 – Результаты сравнительного анализа

Температура	Углы, град	Компенсация		Модели выходных сигналов датчиков	
		(12)	(13)	(4) – (6) с возмущениями	(1) – (5) эталонные значения
30°	$\gamma$	-2,380	-3,200	-2,41	-3,25
	$\nu$	2,350	1,750	2,40	1,84
	$\psi$	-81,740	-92,110	-81,47	-92,04
-28°	$\gamma$	-3,860	-3,170	-3,89	-3,25
	$\nu$	2,710	1,709	2,78	1,84
	$\psi$	-79,800	-92,370	-79,44	-92,04

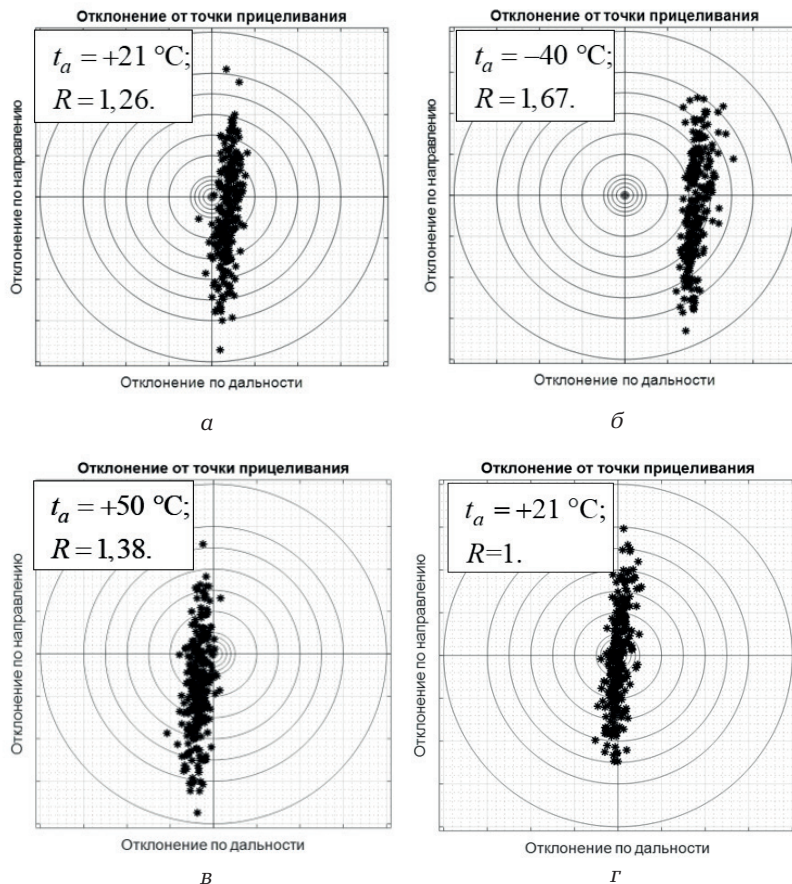


Рисунок 3 — Отклонения от точки прицеливания:  
 а, б, в — не используются (12) — (13); г — используется (13)

екта от погрешностей измерений датчиков БИНС был использован метод статистического моделирования Монте-Карло. По итогам 100 имитаций оценивалось значение нормированной круговой ошибки  $R$  — отклонение точки падения объекта от точки прицеливания:

$$R = \sqrt{\delta_y^2 + \delta_x^2}, \quad (14)$$

где  $\delta_y, \delta_x$  — нормированные среднеквадратические отклонения (СКО) ошибок по усредненным координатам.

Как видно из рисунка 3, значение круговой ошибки  $R$  имеет более сильную зависимость от температурного воздействия (особенно в области отрицательных температур), чем от неортогональностей осей датчиков.

### Выводы

Таким образом, проведенные исследования показали, что смещение нулей инерциальных датчиков БИНС в зависимости от температуры оказывает более значительное влияние на точность системы навигации, чем неортогональность их осей. Данный результат означает, что при проектировании систем наведения особое внимание должно уделяться вопросу температурной калибровки датчиков, минимизации ошибок аппроксимации температурных зависимостей и месту установки в корпусе блока чувствительных элементов датчиков температуры. Внедрение предложенной компенсации, позволит повысить точность наведения высокоманевренного объекта до 30 % при минимальных вычислительных затратах.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мелешко, В. В. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы / В. В. Мелешко, О. И. Нестеренко. – Кировоград : ПОЛИМЕД-Сервис, 2011. – 171 с.
2. Матвеев, В. В. Исследование погрешностей бесплатформенной инерциальной навигационной системы / В. В. Матвеев // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2014. – Вып. 9, Ч. 2. – С. 251 – 259.
3. Матвеев, В. В. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В. В. Матвеев, В. Я. Распопов. – СПб. : ГНЦ РФ ОАО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор», 2009. – 280 с.
4. Вавилова, И. Б. Сравнительный анализ различных вариантов калибровки бескарданной инерциальной навигационной системы / И. Б. Вавилова, А. А. Голован, А. В. Козлов, И. А. Папуша, Н. А. Парусников // XXV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – СПб. : АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018. – С. 249–251.
5. Егоров, Ю. Г. Синтез оптимальных программ калибровки акселерометров БИНС / Ю. Г. Егоров, А. А. Дзюев // Авиакосмическое приборостроение. – 2017. – № 5. – С. 3–17.
6. Водичева, Л. В. Методика оценки точности косвенного метода калибровки бесплатформенного инерциального измерительного блока / Л. В. Водичева, Ю. В. Парышева // XXVI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. – СПб. : АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2019. – С. 193–203.
7. Водичева, Л. В. Оценка точностных параметров датчиков бесплатформенного инерциального измерительного блока с помощью относительно грубого поворотного стола / Л. В. Водичева, Ю. В. Парышева // Гирскопия и навигация. – 2019. – Т. 27, № 2 (105). – С. 162–177.

## REFERENCES

1. Meleshko V.V., Nesterenko O.I. Besplatformennye inertialnye navigatsionnye sistemy [Free-form inertial navigation systems]. Kirovograd, POLIMED-Servis, 2011, 171 p.
2. Matveev V.V. Issledovanie pogreshnostey besplatformennoy inertialnoy navigatsionnoy sistemy [Error investigation of a strapback inertial navigation system] Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki [News of TulSU. Technical sciences]. 2014. pp. 251-259.
3. Matveev V.V., Raspopov V.A. Osnovy postroeniya besplatformennykh inertialnykh navigatsionnykh sistem [Fundamentals of building free-form inertial navigation systems.] St. Petersburg: SSC RF JSC "Concern "Central Research Institute "Electropribor", 2009, 280 p.
4. Vavilova I.B., Golovan A.A., Kozlov A.V., Papusha I.A., Parushnikov N.A. Sravnitelnyy analiz razlichnykh variantov kalibrovki beskardannoy inertialnoy navigatsionnoy sistemy [Comparative analysis of various calibration options for a cardless inertial navigation system] XXV Sankt-Peterburgskaya mezhdunarodnaya konferentsiya po integrirovannym navigatsionnym sistemam [XXV St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems] Saint Petersburg, JSC "Concern "Central Research Institute "Electropribor", 2018, pp. 249-251.
5. Egorov U.G., Dzuev A.A. Sintez optimalnykh programm kalibrovki akselerometrov BINS [Synthesis of optimal calibration programs for BINS accelerometers] Aviakosmicheskoe priborostroenie [Aerospace instrumentation] 2017, pp. 3-17.
6. Vodicheva L.V., Parysheva U.V. Metodika otsenki tochnosti kosvennogo metoda kalibrovki besplatformennogo inertialnogo izmeritel'nogo bloka [The methodology for estimating the accuracy of the indirect calibration method of a strapless inertial measuring unit] XXVI Sankt-Peterburgskaya mezhdunarodnaya konferentsiya po integrirovannym navigatsionnym sistemam [XXVI St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems]. Saint Petersburg, JSC "Concern "Central Research Institute "Electropribor", 2019, pp. 193-203.
7. Vodicheva L.V., Parysheva U.V. Otsenka tochnostnykh parametrov datchikov besplatformennogo inertialnogo izmeritel'nogo bloka s pomoshchyu odnositelno grubogo povorotnogo stola [Estimation of the accuracy parameters of the sensors of a strapless inertial measuring unit using a relatively coarse rotary table] Girokopiya i navigatsiya. Tom 27, № 2 (105) [Gyroscopy and navigation. Volume 27, No. 2 (105)], 2019, pp. 162-177.

*Статья поступила в редакцию  
29.07.2025*

# УПРАВЛЕНИЕ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ТРАЕКТОРИЙ: ПРОБЛЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РЕШЕНИЯ

## TRAJECTORY-BASED AIR TRAFFIC CONTROL: CONSTRUCTION PROBLEMS AND SOLUTION PROSPECTS

*Солодуха Александр Владимирович* – заместитель генерального директора по эксплуатации радиотехнического оборудования и связи государственного предприятия «Белазронавигация», Республика Беларусь

*Alexander Solodukha* – Deputy Director General for Operation of Radio Engineering Equipment and Communications at the State Enterprise «Belaeronavigatsia», Republic of Belarus

**Аннотация:** в статье обсуждаются аспекты реализации концепции управления воздушным движением на основе траекторий с использованием 4D-траекторий. Подробно рассматривается механизм взаимодействия систем управления воздушным движением с воздушными судами, роль систем Automatic Dependent Surveillance-Contract и Controller-Pilot Data Link Communications для передачи данных. Также освещается проблема монополии на рынке передачи данных в сети Aircraft Communications Addressing and Reporting System, контролируемой компаниями SITA и ARINC, а также предложены возможные пути решения, включая примеры создания государственных сетей. Рассматривается развитие технологии Automatic Dependent Surveillance-Contract, включая новый стандарт Contract Baseline 2. Приведены примеры программ развития NextGen в США и Single European Sky ATM Research Joint Undertaking Евросоюза, а также перечислены примеры успешной реализации концепции управления воздушным движением на основе траектории в центрах управления, таких как Maastricht Upper Area Control Centre, Zambia Airports Corporation Limited. Рассмотрены возможности применения концепции управления воздушным движением на основе траектории в условиях Республики Беларусь с учетом глобальных тенденций, направленных на повышение пропускной способности, безопасности и эффективности воздушного движения. Предложены меры по снижению технологической зависимости и обеспечению устойчивости национальной инфраструктуры управления воздушным движением.

**Ключевые слова:** управление воздушным движением, 4D-траектория, TBO, ADS-B, ADS-C, CPDLC, ACARS, государственные авиационные сети передачи данных.

**Abstract:** the article discusses aspects of implementing the concept of trajectory-based air traffic control using 4D trajectories. The mechanism of interaction between air traffic control systems and aircraft, the role of Automatic Dependent Surveillance-Contract and Controller-Pilot Data Link Communications systems for data transmission are considered in detail. The problem of monopoly in the data transmission market in the Aircraft Communications Addressing and Reporting System network controlled by SITA and ARINC is also covered, and possible solutions are proposed, including examples of creating state networks. The development of Automatic Dependent Surveillance-Contract technology, including the new Contract Baseline 2 standard, is considered. Examples of NextGen development programs in the USA and Single European Sky ATM Research Joint Undertaking in the European Union are given, and examples of successful Trajectory Based Operations implementation in control centers such as Maastricht Upper Area Control Centre, Zambia Airports Corporation Limited are listed. The applicability of Trajectory Based Operations in the Republic of Belarus is considered in the context of global trends aimed at increasing airspace capacity, safety, and operational efficiency. Recommendations are made to reduce technological dependence and enhance the resilience of the national air traffic control infrastructure.

**Keywords:** air traffic control, 4D trajectory, TBO, ADS-B, ADS-C, CPDLC, ACARS, state aviation data networks.

### Введение

Существующие процедуры и технологии управления воздушным движением (УВД) в скором времени не смогут удовлетворить возросший спрос на воздушные перевозки при сохранении того же уровня безопасности. Решение этой проблемы потребует радикального изменения всей системы организации воздушного движения (ОрВД). А именно произойдет

переход от УВД на основе разрешений к операциям УВД на основе траекторий.

Концепция управления воздушным движением на основе траекторий (ТВО) является ключевой частью модернизации систем УВД в свете увеличения пропускной способности. Она направлена на оптимизацию воздушных маршрутов и повышение безопасности полетов за счет использования точных траекторий движения воздушных судов. 4D-траектория, которая учитывает не только пространственные

координаты (широта, долгота, высота), но и временные метки, позволяет диспетчерам прогнозировать и управлять полетами с большей точностью. Для эффективного выполнения этих задач требуется тесное взаимодействие между воздушными судами и наземными системами управления, которое осуществляется с помощью технологий Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B), Controller-Pilot Data Link Communications (CPDLC) и Automatic Dependent Surveillance-Contract (ADS-C).

Тем не менее, успешная реализация ТВО сталкивается с рядом технических и экономических вызовов. Одной из наиболее серьезных проблем является зависимость от компаний SITA и ARINC, которые монополизировали рынок передачи данных через сеть Aircraft Communications Addressing and Reporting System (ACARS). В данной статье мы рассмотрим текущие проблемы и возможные пути их решения, а также представим примеры успешной реализации ТВО.

### **Механизмы взаимодействия системы УВД и воздушного судна при использовании 4D-траекторий**

Вначале перечислим основные системы, необходимые для построения ТВО.

Основной инструмент наблюдения ADS-B представляет собой систему автоматического зависимого наблюдения, которая передает данные о местоположении воздушного судна, его скорости и высоте на наземные станции в реальном времени. Это позволяет диспетчерам получать актуальные данные о траектории полета и координировать маршруты самолетов.

Плюс данной системы — это низкая стоимость по сравнению с другими средствами наблюдения. Кроме того, данная система не нагружает эфир и без того занятом воздушном пространстве.

Однако у нее есть существенный минус. Одной из значительных уязвимостей системы ADS-B является возможность подделки ответов, так как сигналы передаются в открытом виде и не имеют встроенной аутентификации. Это создает потенциальные риски для безопасности, такие как спуфинг (подмена) и джамминг (глушение).

В контексте ТВО система ADS-B позволяет отслеживать выполнение 4D-траектории и своевременно корректировать маршрут в зависимости от текущей ситуации в воздушном пространстве.

Средство связи между диспетчером и пилотом CPDLC (Controller-Pilot Data Link Communications) заменяет голосовую связь, обеспечивая более быстрый и точный обмен информацией. Для реализации 4D-траекторий CPDLC играет ключевую роль в передаче команд на изменение траектории, высоты или времени прибытия в определенную точку маршрута.

Контрактное наблюдение ADS-C (Automatic Dependent Surveillance-Contract) — это система автоматического зависимого наблюдения, основанная на контракте между воздушным судном и наземной системой УВД. В отличие от ADS-B, который передает данные в режиме реального времени без запроса, ADS-C работает по контрактной модели, при которой информация передается по заранее установленным условиям в зависимости от определенных триггеров или временных интервалов.

Контракт заключается между воздушным судном и системой УВД на передачу данных в течение определенного времени или по определенным условиям. Контракт может быть разных типов: периодический, при событии, по запросу или по изменению. Например, авиадиспетчер может настроить систему так, чтобы данные передавались каждые 15 минут или при изменении высоты полета.

Различают несколько типов отчетов:

- отчет о положении (Position Report): включает текущие координаты воздушного судна (широта, долгота, высота), а также информацию о скорости и направлении;

- отчет о прогнозируемом положении (Predicted Route Report): содержит информацию о будущих точках маршрута, куда самолет планирует двигаться;

- отчет о событии (Event Report): генерируется при наступлении определенных условий, например, при достижении определенной высоты или изменении курса;

- отчет по запросу (Demand Report): передается по запросу диспетчера в любой момент времени.

В настоящее время идет активное развитие данной технологии в новом стандарте Contract Baseline 2 (ADS-C B2). ADS-C B2 позволяет передавать более точные и полные данные [1] о траектории воздушного судна. Это информация о текущем положении, прогнозируемой траектории, а также данные о намерениях пилота. В отличие от базовой версии ADS-C, B2 включает функциональность прогнозирования на основе изменений погодных условий или других факторов, что позволяет диспетчерам заранее корректировать траектории полета.

ADS-C B2 поддерживает передачу данных о состоянии систем воздушного судна. На данный момент, известно о 10 000 самолетов с поддержкой передачи данных, многие из которых теперь летают с новейшей технологией ATS B2 [2].

Система ACARS используется для передачи текстовых сообщений и данных между воздушными судами и наземными станциями, включая команды диспетчеров и данные от бортовых систем (ADS-C и CPDLC). На рынке передачи данных через ACARS доминируют компании SITA и ARINC, которые обеспечивают глобальную инфраструктуру для обмена информацией, и это становится основной проблемой эксплуатации — зависимость от провайдеров услуг.

Данная ситуация создает риски для стабильности и безопасности передачи данных. Чем же чревата зависимость структуры национальной УВД от частных компаний?

Во-первых, как любые монополисты, данные компании в праве диктовать любые тарифы на свои услуги.

Во-вторых, в условиях технических сбоев компании провайдера существует угроза нарушения связи между воздушными судами и диспетчерами.

В-третьих, геополитическая обстановка в регионе или кризис в международных межбанковских расчетах может стать причиной отказа от сервиса с зарубежной компанией.

Одним из возможных путей решения проблемы монополии является создание собственных государственных или региональных сетей для передачи данных, которые могут заменить частную инфраструктуру. Примером может служить инициатива российской

компании «Азимут», которая начала развертывание сети ACARS для внутренних нужд российских авиакомпаний. После введения западных санкций, которые ограничили доступ российских авиакомпаний к услугам SITA и ARINC, «Азимут» начал установку наземных станций для передачи данных в аэропортах, таких как Шереметьево, и провел успешное тестирование на самолетах «Аэрофлота». Планируется дальнейшее развертывание сети с установкой около 50 станций по всей территории России [3].

### Примеры успешной реализации построения ТВО

Центр управления воздушным движением Maastricht Upper Area Control Centre (MUAC) успешно внедрил систему ТВО с использованием 4D-траекторий, CPDLC и ADS-C. Этот центр управляет воздушным движением в верхнем воздушном пространстве Бельгии, Нидерландов, Люксембурга и северо-западной Германии. Благодаря интеграции данных от наземных станций и цифровой связи через CPDLC, MUAC повысил точность управления воздушным трафиком и снизил задержки [4].

В Замбии компания Zambia Airports Corporation Limited (ZACL) внедрила собственную сеть передачи данных для поддержки CPDLC и ADS-C. Это позволило обеспечить эффективное управление воздушным движением даже в удаленных районах страны, где ранее использовались услуги международных поставщиков. Внедрение собственной инфраструктуры позволило снизить операционные расходы и повысить национальную безопасность [5].

В воздушных трассах Северной Атлантики (NAT – North Atlantic Tracks), где наземное наблюдение не действует, ADS-C играет важнейшую роль. При пересечении Атлантического океана, где нет наземных станций ADS-B, система ADS-C позволяет диспетчерам отслеживать траектории самолетов, получать данные о положении и прогнозируемом маршруте. Воздушные суда, пересекающие океан, используют спутниковую связь для передачи данных в центры управления, такие как Gander (Канада) и Shanwick (Ирландия).

В Тихоокеанском регионе, где тоже преобладает океаническое воздушное пространство, система ADS-C используется для обеспечения контроля за воздушными судами, которые находятся за пределами зоны действия наземных радаров и ADS-B. Так работает японский центр УВД в Fukuoka и Oakland Oceanic FIR (KZAK) в США. Использование CPDLC и ADS-C в этих зонах возможно через спутниковые системы Inmarsat и Iridium [6].

Нельзя пройти стороной решения для коммерческой авиации от известной мировой компании и лидера в технологиях авиационной связи и систем УВД Thales. Это система спутниковой связи FlytLINK. Она обеспечивает помехоустойчивое масштабируемое решение с использованием широкополосных услуг Iridium Certus через сеть из 66 спутников, кото-

рые покрывают 100 % земного шара, включая полюса и океаны. FlytLINK использует эту надежную сеть для предоставления высоконадежной, мобильной и неограничиваемой голосовой, текстовой и информационной связи для пилотов, экипажей и бизнес-пассажиров. Для безопасности полетов система обеспечит связь по CPDLC, ADS-C. Для кабины пилотов будет доступна голосовая связь и услуги ACARS [7].

Стоит отметить ряд организаций, которые занимаются развитием и популяризацией концепции ТВО.

Программа NextGen, реализуемая в США, направлена на модернизацию системы управления воздушным движением с использованием технологий ADS-B и CPDLC. Основная цель программы – создание независимой инфраструктуры для управления воздушным движением на территории США. Внедрение NextGen за счет спутниковых ретрансляторов позволило снизить зависимость от SITA и ARINC и улучшить взаимодействие между воздушными судами и диспетчерами в реальном времени.

SESAR (Single European Sky ATM Research) – это программа Европейского Союза, направленная на модернизацию управления воздушным движением (ATM) в Европе. Она является частью более широкой инициативы «Единое Европейское Небо» (Single European Sky, SES), которая ставит целью оптимизировать использование воздушного пространства, повысить безопасность и эффективность полетов, а также сократить задержки и выбросы углекислого газа. SESAR тесно сотрудничает с NextGen в США, что способствует созданию глобальной системы управления воздушным движением. Это позволяет реализовывать сквозные маршруты, учитывающие траектории в воздушном пространстве разных стран. Одним из инструментов реализации SESAR являются демонстрационные проекты Digital Sky, которые показывают преимущества новых технологий в реальных условиях. В рамках этих проектов проводится тестирование и оценка технологий ТВО, CPDLC, ADS-B и других решений.

### Заключение

ТВО и 4D-траектории открывают новые возможности для повышения безопасности и эффективности полетов. Именно ТВО станет ключевым элементом для увеличения пропускной способности систем УВД и, как следствие, позволит Республике Беларусь конкурировать на рынке аэронавигационных услуг в Европе. По общемировой тенденции ТВО – это главный вектор развития систем УВД.

Однако успешная реализация этой концепции требует решения проблем, связанных с зависимостью от частных поставщиков услуг связи. Создание государственной сети для поддержки CPDLC и ADS-C представляется одним из наиболее эффективных решений, которое позволит снизить затраты и обеспечить независимость национальной системе УВД в будущем.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. NATS. "Digital Skies: Advancing Air Traffic Control with ADS-C Technology". – URL: <https://nats.aero/blog/2023/10/digital-skies-advancing-air-traffic-control-with-ads-c-technology/> (дата обращения: 23.09.2024).
2. SESAR. "Aircraft equipage paves way for more efficient air traffic management". – URL: <https://sesar.ju/news/aircraft-equipage-paves-way-more-efficient-air-traffic-management> (дата обращения: 23.09.2024).
3. Aeroo.ru. «Российские авиакомпании готовятся к восстановлению работы связи ACARS». – URL: <https://aeroo.ru/news/49416481-rossiyskie-aviakompanii-gotoviyatsya-k-vozstanovleniyu-raboty-svyazi-acars> (дата обращения: 23.09.2024).
4. EUROCONTROL. "MUAC starts operational use of ATN Automatic Dependent Surveillance-Contract (ADS-C)". – URL: <https://www.eurocontrol.int/press-release/muac-starts-operational-use-atn-automatic-dependent-surveillance-contract-ads-c> (дата обращения: 23.09.2024).

5. "Thales to modernise Zambia's air traffic control with latest TopSky ATC solution". – URL: [https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/aerospace/press\\_release/thales-modernise-zambias-air-traffic-control-latest-topsky-atc](https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/aerospace/press_release/thales-modernise-zambias-air-traffic-control-latest-topsky-atc) (дата обращения: 23.09.2024).
6. FAA Oakland Oceanic Airspace - ENR 7.2 Data Link Procedures. – URL: [https://www.faa.gov/air\\_traffic/publications/atpubs/aip\\_html/part2\\_enr\\_section\\_7.2.html](https://www.faa.gov/air_traffic/publications/atpubs/aip_html/part2_enr_section_7.2.html) (дата обращения: 23.09.2024).
7. Thales FlytLINK. – URL: <https://www.thalesgroup.com/en/markets/market-specific-solutions/mobile-satellite-services/thales-flytlink> (дата обращения: 23.09.2024).

## REFERENCES

1. NATS. "Digital Skies: Advancing Air Traffic Control with ADS-C Technology", available at: <https://nats.aero/blog/2023/10/digital-skies-advancing-air-traffic-control-with-ads-c-technology/> (accessed 23.09.2024).
2. SESAR. "Aircraft equipage paves way for more efficient air traffic management", available at: <https://sesarju.eu/news/aircraft-equipage-paves-way-more-efficient-air-traffic-management> (accessed 23.09.2024).
3. Aeroo.ru. "Russian Airlines Prepare to Restore ACARS Communications." September 26, 2022, available at: <https://aeroo.ru/news/49416481-rossiyskie-aviakompanii-gotoviyatsya-k-vosstanovleniyu-raboty-svyazi-acars/> (accessed 23.09.2024).
4. EUROCONTROL. "MUAC starts operational use of ATN Automatic Dependent Surveillance-Contract (ADS-C)", available at: <https://www.eurocontrol.int/press-release/muac-starts-operational-use-atn-automatic-dependent-surveillance-contract-ads-c> (accessed 23.09.2024).
5. "Thales to modernise Zambia's air traffic control with latest TopSky ATC solution", available at: [https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/aerospace/press\\_release/thales-modernise-zambias-air-traffic-control-latest-topsky-atc](https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/aerospace/press_release/thales-modernise-zambias-air-traffic-control-latest-topsky-atc) (accessed 23.09.2024).
6. FAA Oakland Oceanic Airspace - ENR 7.2 Data Link Procedures, available at: [https://www.faa.gov/air\\_traffic/publications/atpubs/aip\\_html/part2\\_enr\\_section\\_7.2.html](https://www.faa.gov/air_traffic/publications/atpubs/aip_html/part2_enr_section_7.2.html) (accessed 23.09.2024).
7. Thales FlytLINK, available at: <https://www.thalesgroup.com/en/markets/market-specific-solutions/mobile-satellite-services/thales-flytlink> (accessed 23.09.2024).

*Статья поступила в редакцию  
30.07.2025*

# КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГЛАВНОГО РЕДУКТОРА ВЕРТОЛЕТА ВИБРОАКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

## CONTROL OF THE TECHNICAL CONDITION OF THE MAIN GEARBOX OF A HELICOPTER BY THE VIBROACOUSTIC METHOD

**Санько Андрей Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Республиканского производственного унитарного предприятия «Завод точной электромеханики», Республика Беларусь  
a.sanko@ztem.by

**Andrey Sanko** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher at the Republican Production Unitary Enterprise Precision Electromechanics Plant, Republic of Belarus  
a.sanko@ztem.by

**Потапов Вячеслав Александрович** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь  
potapstark@gmail.com

**Vyacheslav Potapov** – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher at the Scientific Research Laboratory of the Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus  
potapstark@gmail.com

**Аннотация:** одним из основных путей повышения достоверности определения технического состояния высоконагруженных элементов вертолетов и экономичности их эксплуатации является использование методов неразрушающего контроля. Установлено, что виброакустический метод является одним из основных методов для контроля и диагностирования технического состояния трансмиссии вертолетов. Контроль уровня вибраций позволяет получить информацию о состоянии основных элементов трансмиссии вертолета с возможностью раннего обнаружения дефекта, необходимую инженерно-техническому составу для принятия решения о замене детали. Рассмотрено общее состояние вибродиагностики трансмиссии вертолетов, особенности продукции фирм – производителей аппаратных и программных средств. Представлены результаты исследований по влиянию условий контроля на вибропризнаки, характеризующие техническое состояние передач главного редуктора вертолета типа Ми-8. Найден математические зависимости, позволяющие рассчитать значение вибропризнаков передачи первой ступени главного редуктора от условий контроля. Для успешного решения диагностической задачи определено и обосновано место установки вибропреобразователя на объекте контроля. Сформулирован алгоритм контроля технического состояния передач приводов главного редуктора вертолета виброакустическим методом. Использование разработанного алгоритма в бортовой системе вибродиагностики трансмиссии вертолета позволит провести оперативный контроль технического состояния его главного редуктора, как на земле, так и в воздухе. Проведены предварительные испытания бортовой системы вибродиагностики, доказана работоспособность разработанных методик и алгоритмов.

**Ключевые слова:** вибродиагностика, трансмиссия, вертолет, техническое состояние передач приводов главного редуктора, вибропреобразователь, частотный спектр вибрации трансмиссии вертолета.

**Abstract:** one of the main ways to increase the reliability of determining the technical condition of high-load helicopter components and the cost-effectiveness of their operation is to use non-destructive testing methods. It has been established that the vibration-acoustic method is one of the main non-destructive testing methods for monitoring and diagnosing the technical condition of helicopter transmission systems. Monitoring the vibration levels allows for the early detection of defects in the main components of the helicopter transmission system, providing valuable information for engineers and technicians to make informed decisions about component replacement. This article explores the current state of vibration diagnostics for helicopter transmission systems and the features of hardware and software products available from various manufacturers. The article presents the results of research on the effect of control conditions on the vibration characteristics of the main gearbox of the Mi-8 helicopter. Mathematical dependencies have been found that allow the calculation of the value of the vibration features of the first stage of the main gearbox transmission from the control conditions. For the successful solution of the diagnostic problem, the installation location of the vibration transducer at the monitoring facility has been determined and justified. An algorithm has been formulated for monitoring the technical condition of the helicopter's main gearbox drives using the vibroacoustic method. The use of this algorithm in the helicopter's onboard vibration diagnostics system will allow for the operational monitoring of the technical condition of its main gearbox, both on the ground and in the air. Preliminary tests of the onboard vibration diagnostics system have been conducted, proving the effectiveness of the developed methods and algorithms.

**Keywords:** vibration diagnostics, transmission, helicopter, and technical condition of the main gearbox drives, vibration converter, frequency spectrum of helicopter transmission vibration.

## Введение

В настоящее время для механических систем вертолетов принята стратегия технического обслуживания и ремонта по наработке. Данная стратегия предусматривает выполнение планово-предупредительных работ, включающих разборку механизмов и деталей после отработки ими определенного срока эксплуатации или при определенном налете вертолета. Такие работы являются достаточно трудоемкими и требуют больших временных затрат на их выполнение. Кроме того, при создании вертолета с очень сложной конструкцией механических агрегатов, стараются добиться равенства прочности всех элементов механизмов и деталей. Однако условия эксплуатации этих вертолетов настолько разнообразны, что значения многих параметров изменяются в очень широких пределах, нередко достигают предельных уровней и даже превосходят их. В результате падает эффективность системы планово-предупредительных работ, поскольку она не позволяет своевременно выявить опасные отклонения параметров, обнаружить отказы и скрытые дефекты, предотвратить появление неисправностей и спрогнозировать остаточный ресурс механических агрегатов вертолетов.

Для повышения контролепригодности и экономичности эксплуатации вертолетов широко применяются методы неразрушающего контроля. Среди них особое место занимает виброакустический метод.

*Современное состояние вибродиагностики трансмиссии вертолетов.* Корпорация UTC Aerospace Systems (США) рекламирует разработанную бортовую систему вибродиагностики трансмиссии вертолетов HUMS (*Health & Usage Monitoring Systems*) [1]. Контроль уровня вибраций позволяет получить информацию о состоянии основных узлов и агрегатов, а также обнаружить дефект на ранней стадии, что необходимо инженерно-техническому составу для принятия решения о замене детали. Ключевым элементом HUMS является программное обеспечение, которое анализирует информацию, поступающую от датчиков вибрации, установленных на двигателях и трансмиссии, и накапливающуюся бортовыми регистраторами. Неполный перечень вертолетов, оснащенных системами HUMS, производства США, ЮАР, Израиля и других, насчитывает уже около трех десятков моделей.

Аналогичная разработка компании *Farnell* (Россия) — бортовая система позволяющая производить контроль и диагностику редукторов вертолетов по вибрационным параметрам [1]. Система обеспечивает одновременное получение и обработку данных от вибродатчиков в реальном времени, проведение математической обработки сигналов и сохранение в памяти результатов контроля. Российская компания *Авиашельф* оборудовала несколько своих вертолетов Ми-8 системой контроля и диагностики компании *Farnell*. Есть и другие аналогичные разработки для вертолетов, например *Vibration Management Enhancement Program (VMEP)* и др. Названные зарубежные разработки являются либо поисково-исследовательскими, либо полностью закрытыми, так как имеют элементы ноу-хау.

В Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси и Минском автомобильном заводе ведутся работы по перспективным системам диагностики механических систем только автомобильной техники. Например, в Объединенном институте машиностроения

НАН Беларуси создана бортовая автоматизированная система вибродиагностики редукторов мотор-колес (РМК) большегрузных самосвалов БелАЗ. Для авиационной техники такие разработки не ведутся.

## Постановка задачи

Разработать алгоритм контроля технического состояния (ТС) передач главного редуктора вертолета с использованием виброакустического метода.

## Решение задачи

Задача решалась в несколько этапов:

1. Выбор вибрационных признаков (ВП), характеризующих ТС основных элементов главного редуктора (ГР) вертолета, и места установки вибропреобразователя.

2. Анализ влияния условий контроля на ВП, характеризующие ТС передач основных приводов ГР.

3. Разработка алгоритма контроля передач приводов ГР с использованием виброакустического метода.

Валы приводов ГР вращаются в разных плоскостях, что является причиной дополнительной нагрузки, значительная часть которой направлена радиально каждому из валов. При такой нагрузке крайне редко возникают автоколебания вала в подшипниках, а наиболее распространенным дефектом является износ деталей зубчатых передач, входящих в зацепление [2, 3]. Проведенные экспериментальные исследования показали, что спектр вибрации, возбуждаемый зубчатой передачей ГР, — дискретный (рисунок 1). В нем основной информационной частотой, характеризующей ТС передачи (степень износа зубьев, искажение профиля одного из взаимодействующих зубьев, вырыв зуба и т. д.), является частота  $f_z = f_a z$ , где  $f_a$  — частота вращения зубчатого колеса,  $z$  — число зубьев [2, 3].

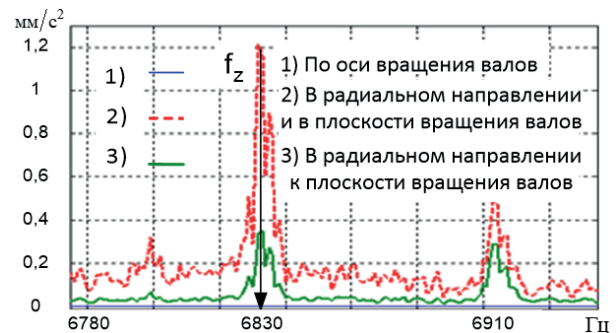


Рисунок 1 — Экспериментальный спектр вибрации вертолета Ми-8 в диапазоне частот, возбуждаемом зубьями первой ступени главного редуктора ВР-14 по трем осям измерения

Поскольку амплитуды гармонических составляющих спектра вибрации вертолета определяют среднюю мощность вибросигнала, то в качестве ВП, характеризующего ТС зубчатой передачи, было выбрано среднеквадратическое значение (СКО) гармонической составляющей виброускорения вертолета, рассчитанное на частоте  $f_z$  контролируемой передачи.

Успешное решение диагностической задачи в значительной степени определяется выбором места установки вибропреобразователя на объекте контроля [2, 3]. В качестве места установки вибропреобразо-



Рисунок 2 – Размещение вибропреобразователя при контроле ТС главного редуктора вертолета типа Ми-8

вателя был выбран силовой шпангоут, располагаемый в грузовой кабине под ГР в районе центра масс вертолета (рисунок 2).

Выбор места установки вибропреобразователя обусловлен следующими факторами:

- высокая информативность вибрационного сигнала;
- удобство крепления и безопасность установки вибропреобразователя;
- отсутствие необходимости доработки электрической схемы вертолета;
- минимальное влияние температуры окружающей среды;
- минимальное влияние резонансных явлений фюзеляжа вертолета;
- отсутствие попадания влаги и масел в вибропреобразователь, разъем и т. д.

Анализ влияния условий контроля на ВП. Эффективность контроля повышается при независимости ВП, характеризующих ТС объекта контроля, от внешних факторов [2, 3]. Для ГР к основным условиям контроля (внешних факторам), которые в процессе эксплуатации вертолета не могут быть постоянными, относятся:

- высотно-режимные факторы (зависящие от режима полета: высота  $H$  и скорость  $V$  полета, масса вертолета  $m_v$ , обороты несущего винта (НВ)  $n_{нв}$ , давление  $P$  и температура  $T$  масла в ГР, балансировочные углы скольжения  $\beta_{ск}$  или крена  $\gamma$ );
- эксплуатационные факторы (зависящие от индивидуальных особенностей объекта нагрузки – стати-

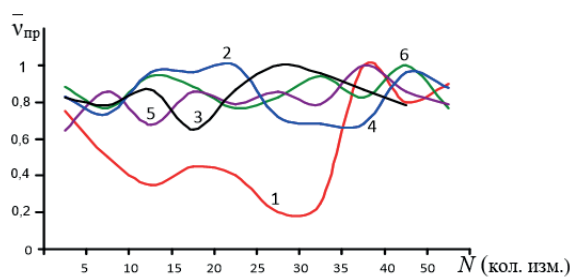


Рисунок 3 – Экспериментально полученные зависимости относительных значений ВП передач приводов главного редуктора ВР-14:

- 1 – первой ступени ГР; 2 – компрессора; 3 – насоса;
- 4 – генератора; 5 – рулевого винта; 6 – третьей ступени ГР

Таблица 1 – Фрагмент информативных частот спектра вибрации трансмиссии вертолета типа Ми-8 при частоте вращения турбокомпрессора двигателя 95 %

Передача привода	$f_z$ , Гц
рулевому винту	1339
насосам	1898
маслоагрегату	2318
вентилятору	3350
компрессору	3397
1-й ступени редуктора	6741
2-й ступени редуктора	3148
3-й ступени редуктора	100

ческого момента  $S_\lambda$  и угла установки  $\alpha_\lambda$  каждой лопасти НВ).

Анализ экспериментальных данных (рисунок 3 и таблица 1) показал, что значения ВП передач приводов практически не зависят от условий контроля, за исключением ВП первой ступени ГР (ВП1). Полученный результат объясняется непостоянством нагрузки, действующей на НВ (изменяется угол атаки лопастей в зависимости от условий эксплуатации).

Современный метод исключения влияния условий контроля на ВП1 базируется на определении их зависимости от значимых условий контроля [2, 3]. Со стороны НВ на первую ступень ГР действует суммарный момент

$$M_p = M_c + M_{ин}, \quad (1)$$

где  $M_c$  – момент сопротивления вращению создаваемый аэродинамическими силами, действующими на лопасти НВ;

$M_{ин}$  – момент от тангенциальных сил инерции, возникающих при наличии углового ускорения [4].

Условия контроля:  
 $0 \leq V \leq 220$  км/ч;  
 $0 \leq H \leq 1,5$  км;  
 $\beta_{ск} \approx -3^\circ$ ;  
 $n_{нв} = (95 \pm 2)\%$ ;  
 $m_b = \pm 12\% m_b^{ном}$ ;  
 $P = (3,5 \pm 0,5)$  кг/см<sup>2</sup>;  
 $T = (50 - 80)^\circ C$

Для режима горизонтального полета  $M_{\text{нн}} = 0$ . Выражение для расчета  $M_c$  имеет вид

$$M_c = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left( \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^R c_{yi} \rho b (\omega [(r-L) \cos \beta_{li} + L] + V \cos \alpha_{\text{нв}} \sin \psi) \left( (V \sin \alpha_{\text{нв}} - v) \cos \beta_{li} - V \cos \psi \sin \beta_{li} - (r-L) \frac{d\beta_{li}}{d\psi} \right) r dr d\psi + \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^R c_{xi} \rho b (\omega [(r-L) \cos \beta_{li} + L] + V \cos \alpha_{\text{нв}} \sin \psi)^2 r dr d\psi \right), \quad (2)$$

где  $L$  – разнос горизонтальных шарниров;

$R, \omega$  – радиус и обороты НВ;

$c_{yi}, c_{xi}$  – средний по диску коэффициент подъемной силы и коэффициент профильного сопротивления сечения  $i$ -й лопасти, зависящие от числа Маха и угла атаки сечения лопасти  $\alpha_i$ ;

$\rho$  – плотность воздуха;

$b$  – хорда лопасти;

$r, \psi$  – длина и азимутальное положение лопасти;

$\beta_{li}$  – угол взмаха  $i$ -й лопасти;

$\alpha_{\text{нв}}$  – угол атаки НВ [4–5].

Угол атаки сечения лопасти:

$$\alpha_{ri} \approx \varphi_{ri} + \frac{U_{xi}}{U_{yi}}, \quad (3)$$

где  $U_{xi}, U_{yi}$  – горизонтальная и вертикальная составляющая скорости обтекания сечения лопасти;

$\varphi_{ri}$  – шаг лопасти НВ в сечении с учетом ее индивидуальной балансировки.

$$\varphi_{ri} = \varphi_{\text{ош}} + \Delta\varphi_i + \varphi_{0i} - k_{\text{в}} \beta_{li} - (D_1 \chi + D_2 \eta) \sin \psi + (D_1 \eta - D_2 \chi) \cos \psi, \quad (4)$$

где  $\varphi_{\text{ош}}$  – общий шаг НВ;

$\Delta\varphi$  – угол закрутки лопасти относительно сечения  $\bar{r} = 0,7$ ;

$\varphi_{0i}$  – угол установки  $i$ -й лопасти у комля;

$k_{\text{в}}$  – коэффициент компенсатора взмаха;

$D_1, D_2$  – передаточное число системы управления циклическим шагом в продольной и поперечной плоскости;

$\eta, \chi$  – балансировочные углы отклонения АП в поперечной и продольной плоскости.

Используя выражение (2) и экспериментальные данные (рисунок 4), получена зависимость ВП1 от крутящего момента:

$$\bar{v}_1^{cm1} = a^v \bar{M}_c + b^v, \quad (5)$$

где  $a^v, b^v$  – коэффициенты;

$\bar{v}_1, \bar{M}_c$  – относительные значения ВП и крутящего момента ( $M_c = M_c^{\text{max}} / M_c^{\text{max}}$ , где  $M_c^{\text{max}}$  – максимальное значение крутящего момента НВ).

Для исследования влияния условий контроля на величину ВП1, был проведен факторный анализ. Анализ проводился с использованием выражений (2)–(5), с учетом случайной составляющей, обусловленной чувствительностью вибропреобразователя. Закон распределения случайной составляющей счи-

тлся нормальным [2, 3]. В качестве нулевых значений факторов были взяты типовые эксплуатационные режимы вертолета Ми-8. Потери на моменты трения в трансмиссии составляют не более 3–4% [6], поэтому влияния флуктуации давления и температуры масла в главном редукторе при проведении факторного анализа не учитывались.

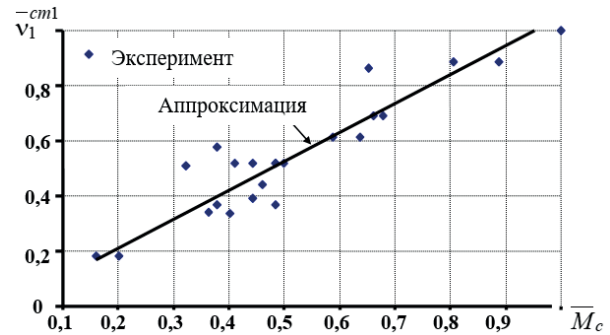


Рисунок 4 – Зависимость ВП1 от крутящего момента в относительных единицах

Результаты моделирования. Зависимости ВП1 от условий контроля, на режиме:

- наземной эксплуатации:

$$\bar{v}_1^{cm1} = a_0 + a_1 \bar{m} + a_2 \bar{n}_{\text{нв}}. \quad (6)$$

- горизонтального полета:

$$\bar{v}_1^{cm1} = a_0 + a_1 \bar{m} + a_2 \bar{V} + a_4 \bar{n}_{\text{нв}} + a_5 \bar{mV} + a_6 \bar{mH} + a_7 \bar{m n}_{\text{нв}} + a_8 \bar{HV} + a_9 \bar{n}_{\text{нв}} \bar{V} + a_{10} \bar{H n}_{\text{нв}}, \quad (7)$$

где  $a_j, (j = \overline{1,10})$  – коэффициенты;

$\bar{V} = V / V^{\text{max}}, \bar{H} = H / H^{\text{max}}$  – относительные значения условий контроля;

$V^{\text{max}}, H^{\text{max}}$  – максимально возможные значения для типовых режимов эксплуатации;

$V, H$  – текущие значения условий контроля;

$$\bar{v}_1^{cm1} = v_{1(\text{эт})}^{cm1(3д)} / v_{1(\text{эт})}^{cm1(\text{max})},$$

где  $v_{1(\text{эт})}^{cm1(3д)}, v_{1(\text{эт})}^{cm1(\text{max})}$  – эталонное значение ВП1 при заданных и максимально возможных условиях контроля.

Поскольку идеальная балансировка НВ невозможна из-за различий в массовых и аэродинамических характеристиках лопастей [7], был проведен анализ влияния угла установки и статического момента лопасти на величину ВП1, используя формулы (2)–(5).

Угол установки  $\alpha_{li}$  и статический момент лопасти  $S_{li}$  изменялись относительно своего номинального значения. Проведенные исследования (рисунок 5) показывают, что несбалансированность НВ существенного влияния на ВП1 не оказывает.

Таким образом, предлагаемый алгоритм контроля ГР виброакустическим методом представляет собой следующую последовательность действий:

1. Установить вибропреобразователь в грузовой кабине вертолета на силовой шпангоут под главным редуктором в районе центра масс (см. рисунок 2).

2. Провести измерение параметров вибрации вертолета и рассчитать значения ВП1 и ВП с учетом информативности осей измерения для каждой контролируемой передачи приводов и условий контроля (6)–(7).

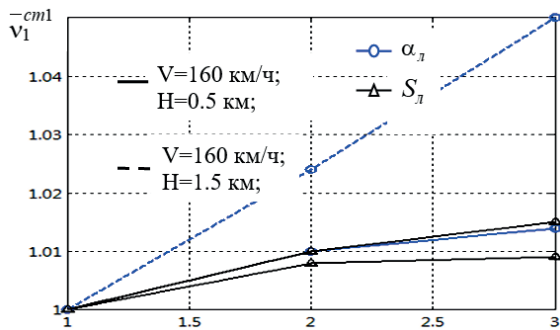


Рисунок 5 – Зависимости относительной величины ВП1 от угла установки и статического момента лопасти в относительных величинах ( $S_l$  увеличили на 25 % от номинала)

3. Сравнить полученные значения ВП и ВП1 приводов главного редуктора с эталонными, используя выражения (8) – (9).

Для первой ступени главного редуктора:

$$\left( v_1^{cm1} / v_1^{cm1(max)} \right) > K \left( v_1^{cm1} \right) + t_{\beta} \delta_m. \quad (8)$$

Для передач основных приводов главного редуктора:

$$\left( v_{пр} \right) > K \left( v_{пр}^{(сп)} \right) + t_{\beta} \delta_m, \quad (9)$$

где  $v_{пр}^{(сп)}$  – средняя величина ВП исправной передачи привода;

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

- Ишин Н. Н., Альгин В. Б. Основные направления развития диагностирования трансмиссионных узлов машин // Механика машин, механизмов и материалов. 2014. № 2 (27). С. 12–22.
- Барков А. В, Баркова Н. А., Азовцев А. Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации. Учеб. пособие. СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2000, – 159 с.
- Карасев В. А., Максимов В. П., Сидоренко М. К. Вибрационная диагностика газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1978. – 132 с.
- Вертолет. Расчет и проектирование: В 2 т. / М. Л. Миль, А. В. Некрасов, А. С. Браверман и др.; Под общ. ред. М. Л. Миль. – М.: Машиностроение, 1966–1967. – Т. 1: Аэродинамика. – 455 с.
- Санько А. А. Математическая модель вибрации вертолета, возбуждаемой несущим винтом на режиме горизонтального полета / А. А. Санько, В. Р. Вашкевич // Сб. науч. ст. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2007. – № 12. – С. 50–57.
- Аэродинамика и динамика полета вертолетов. Под общ. ред. В. Ф. Ромасевича. М.: Машиностроение, 1982. – 483 с.
- Володко А. М. Основы аэродинамики и динамики полета вертолетов. – М.: Транспорт, 1988. – 342 с.

**REFERENCES**

- Ishin N.N., Algin V.B. Osnovnye napravleniya razvitiya diagnostirovaniya transmissionnykh uzlov mashin [Main directions of development of diagnostics of transmission units of machines]. Mechanics of machines, mechanisms and materials. 2014, no. 2 (27), pp. 12-22. (in Russian).
- Barkov A.V., Barkova N.A., Azovtsev A.Yu. Monitoring i diagnostika rotornykh mashin po vibratsii [Monitoring and diagnostics of rotary machines using vibration radio]. Saint Petersburg, Publishing center of Saint Petersburg State Medical University, 2000, 159 p. (in Russian).
- Karasev V.A., Maksimov V.P., Sidorenko M.K. (1978) Vibratsionnaya diagnostika gazoturbinykh dvigatelei [Vibration diagnostics of gas turbine engines]. Moscow, Mechanical Engineering. 1987, 132 p. (in Russian).
- Mil M.L., Nekrasov A.V., Braverman A.S. Vertolet. Raschet i proektirovanie. Tom 1. Aerodinamika [Helicopter. Calculation and design. Vol. 1. Aerodynamics] Ed. M.L.Mil. Moscow, Mechanical Engineering. 1966-1967, 455 p. (in Russian).
- Sanko A.A. Vashkevich V.R. Matematicheskaya model' vibratsii vertoleta, vzbuzhdaemoi nesushchim vintom na rezhime gorizontalnogo poleta [Mathematical model of helicopter vibration excited by the main rotor in horizontal flight mode]. Sbornik nauchnykh statei Voennoi akademii Respubliki Belarus' Sat. scientific Art. Military acad. Rep. Belarus, 2007. no. 12. pp. 50-57 (in Russian).
- Aerodinamika i dinamika poleta vertoletov (1982) [Aerodynamics and flight dynamics of helicopters]. Ed. V.F. Romasevich. Moscow, Mashinostroenie. 1982, 483 p. (in Russian).
- Volodko A.M. (1988) Osnovy aerodinamiki i dinamiki poleta vertoletov [Fundamentals of aerodynamics and flight dynamics of helicopters]. Moscow, Transport, 1988, 342 p. (in Russian).

$K$  – пороговое значение (для среднего дефекта  $K = 10$  дБ, для сильного дефекта  $K = 20$  дБ [1]);  
 $\delta_m$  – среднеквадратическое отклонение оценки;  
 $t_{\beta}$  – квантиль распределения Стьюдента.  
 4. Выход за допустимый диапазон (8) – (9) будет свидетельствовать о неисправности контролируемой передачи ГР.

**Заключение**

В ходе исследований проведен анализ современного состояния вибродиагностики трансмиссии вертолета. На основе анализа предложен алгоритм контроля технического состояния зубчатых передач главного редуктора вертолета типа Ми-8 с использованием виброакустического метода. Для алгоритма контроля предложены математические зависимости, позволяющие рассчитать значение вибропризнака технического состояния зубчатой передачи первой ступени главного редуктора вертолета в зависимости от условий контроля. Представленные зависимости являются линейными и представляют собой полиномы первой степени. Использование разработанного алгоритма в бортовой системе вибродиагностики трансмиссии вертолета, позволит провести оперативный контроль технического состояния его главного редуктора, как на земле, так и в воздухе. Проведены предварительные испытания бортовой системы вибродиагностики, доказана работоспособность методик и алгоритмов.

Статья поступила в редакцию  
 15.08.2025

# ДЕМОНСТРАЦИОННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО АЭРОМЕХАНИКЕ В КУРСЕ ФИЗИКИ

## DEMONSTRATION EXPERIMENT ON AEROMECHANICS IN THE COURSE OF PHYSICS

**Кириленко Алексей Иванович** – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой естественнонаучных и общепрофессиональных дисциплин учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации»  
end-bsaa@yandex.ru

**Aleksey Kirilenko** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Natural Sciences and General Professional Disciplines of the Belarusian State Academy of Aviation  
end-bsaa@yandex.ru

**Филиппенко Ольга Сергеевна** – магистр физико-математических наук, старший преподаватель кафедры общей физики Белорусского государственного университета  
volhafilippenko@gmail.com

**Olga Filippenko** – Master of Physical and Mathematical Sciences, Senior Lecturer of the Department of General Physics of the Belarusian State University  
volhafilippenko@gmail.com

**Аннотация:** рассматриваются разнообразные аэродинамические и статические эксперименты, пригодные для лекционных демонстраций. Обсуждаются общие проблемы, возникающие при лекционных демонстрациях. Рассматриваются их преимущества и недостатки. Отмечается изобилие работ по физическому эксперименту и недостаток работ по аэродинамическим лекционным демонстрациям. Обсуждаются вопросы обтекания тел воздушными потоками и визуализация таких потоков. Предложена простая демонстрация, доказывающая недостаточность простой формулы Стокса для силы сопротивления при обтекании шара потоком воздуха. Приводится описание и физическое обоснование рассматриваемых явлений, например, образование вихрей, смерчей, обтекание тел. Обращается внимание на тонкости при проведении экспериментов. Парадоксы и эффекты, возникающие при наблюдении явлений, сгруппированы, указаны связи между ними. Приводятся эффекты, распространенные в авиации: эффекты Бернулли, Даламбера, Прандтля – Глоерта, Коанда, дорожка фон Кармана, образование вихревых жгутов и другие. Для лучшего усвоения материала предлагается внесение в демонстрацию изученного явления большего числа экспериментов по одной теме, а также чередование теоретического материала и эксперимента, то есть повтор объяснения при последующем проведении другого близкого по сути эксперимента. Основное внимание уделено явлениям, которые сопровождают движение летательных аппаратов.

**Ключевые слова:** физический эксперимент, аэромеханика, визуализация потоков, обтекание тел, аэродинамические силы, моменты аэродинамических сил, эффект подсасывания, эффект Магнуса, давление в струе, число Рейнольдса, ламинарное течение, турбулентное течение, ударная волна, кавитация

**Abstract:** a variety of aerodynamic and static experiments suitable for lecture demonstrations are considered. General problems encountered in lecture demonstrations are discussed. Their advantages and disadvantages are considered. The abundance of works on physical experiments and the lack of works on aerodynamic lecture demonstrations are noted. The issues of air flow around bodies and visualization of such flows are discussed. A simple demonstration is proposed, proving the insufficiency of the simple Stokes formula for the resistance force when an air flow around a sphere is flown. A description and physical justification of the phenomena under consideration are given, for example, the formation of vortices, tornadoes, and flow around bodies. Attention is drawn to the subtleties of conducting experiments. Paradoxes and effects arising from the observation of phenomena are grouped, and the connections between them are indicated. The following effects are common in aviation: the Bernoulli, d'Alembert, Prandtl-Glauert, Coanda effects, von Kármán vortex, the formation of vortex rope, and others. It is proposed to include a larger number of experiments on one topic in the demonstration of the studied phenomenon, as well as alternating theoretical material and experiment for better understanding of the material, that is, repeating the explanation during the subsequent conduct of another experiment that is similar in essence. The main attention is paid to the phenomena that accompany the movement of aircraft.

**Keywords:** physical experiment, aeromechanics, flow visualization, flow around bodies, aerodynamic forces, moments of aerodynamic forces, suction effect, Magnus effect, jet pressure, Reynolds number, laminar flow, turbulent flow, shock wave, cavitation.

### Введение

Физическому эксперименту в современных курсах физики уделяется недостаточное внимание. Преподаватель зачастую сам должен подготовить установки и измерительный инструмент перед занятиями, а на это не всегда хватает времени. Поэтому набирает популярность лекционный демонстраци-

онный эксперимент, когда преподаватель демонстрирует и сам объясняет то или иное физическое явление, процесс. Оперативность, информативность передачи знаний при этом значительно повышается. Материал для таких занятий доступен. Он содержится в занимательной литературе, призванной возбудить интерес к физике в целом, а также в серьезных разработках по демонстрации физических явлений [1].

Требования к лекционным демонстрациям сформулированы А. Б. Млодзеевским (1959 г.) и В. Ф. Шиловым (2000 г.) и включают научность, достоверность, доступность, связь обучения с жизнью, систематичность и последовательность обучения, сознательность и активность учащихся, сочетание различных методов и форм обучения, создание необходимых и достаточных условий для обучения.

Особенностью современной аудитории является недостаточная физико-математическая подготовка первокурсников. У преподавателей в этой ситуации нет ни времени, ни возможностей для глубокого изучения физической сути явлений (просмотренных) и их обстоятельного математического описания. Выходом из такой ситуации может быть внесение в демонстрацию изученного явления большего числа экспериментов по одной теме, а также чередование теоретического материала и эксперимента, то есть повтор объяснения при последующем проведении другого близкого по сути эксперимента. Закон Бернулли демонстрируется на примере притяжения двух гибких плоскостей, между которыми продувается струя воздуха. Затем объясняется, почему вертолет не применяется при спасательных работах при возгорании помещений в высотных зданиях. После чего демонстрируется сближение полосок бумаги, между которыми продувается струя воздуха. В этом случае зазор между полосками очень сильно сужается, то есть силы, сжимающие струю, значительны. Кроме того, полоски (синхронно) колеблются.

В соответствии со спецификой образовательного процесса по физике в БГАА представляется целесообразным более углубленно остановиться на темах «Гидро- и аэростатика» и «Гидро- и аэродинамика». В [1] по первому разделу описано более 30 экспериментов, по второму — более 36. Это «изобилие» не исчерпывает все нюансы демонстрационного эксперимента. Мы сосредоточимся на некоторых демонстрациях, не описанных в [1].

Такие природные явления, как падение семечки клена, падение листьев по замысловатым траекториям, машущий полет насекомых с его удивительной маневренностью и зависанием вызывают восторг и удивление. Но самое удивительное то, что в основе всех этих сложных движений лежат достаточно простые физические законы.

В современном мире все: от дамских шляпок, зонтиков, мотоциклов и авто до целых зданий и микрорайонов создается с учетом действия аэродинамических сил. Однако по непонятной традиции раздел аэро- и гидромеханики практически исключается из общих курсов инженерной подготовки. В лучшем случае изучается закон Бернулли, а из приборов — трубка Пито и трубка Вентури.

Аэродинамический эксперимент широко применяется не только для изучения течения газа или обтекания летательных аппаратов и ракет. В автомобильной промышленности в аэродинамических трубах продуваются не только скоростные гоночные авто, но и автомобили общего потребления. Цель — снижение сопротивления воздуха и уменьшение эмиссии вредных выбросов. В стройиндустрии продуваются не только отдельные здания и сооружения, но и целые кварталы. В аэродинамическом эксперименте изучается воздействие воздушных потоков, которые вызывают силовые, тепловые, вибрационные эффекты. Исследуются силы давления и моменты сил, скорости в различных

частях и точках обтекаемых тел. По скоростям измеряется температура в соответствии с соотношением

$$T = T_0 + \frac{v^2}{2c_p}, \quad (1)$$

где  $T_0$  — температура потока вдали от тела;  
 $T$  — температура газа в точке встречи потока и тела;  
 $v$  — скорость потока в этой точке;  
 $c_p$  — удельная теплоемкость газа при постоянном давлении.

Повышение температуры газа при торможении задается соотношением

$$\Delta T = T_1 \frac{M_{зв}^* \gamma R}{2c_p M^*}, \quad (2)$$

где  $M_{зв}^*$  — число Маха;  
 $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$  — отношение теплоемкостей газа;  
 $R$  — газовая постоянная;  
 $M^*$  — молярная масса.

Температура может быть определена из формулы скорости звука  $a$ :

$$a = \sqrt{\gamma \frac{R}{M^*} T}. \quad (3)$$

Также могут быть определены градиенты плотности  $\rho$  газа при встрече с препятствием по показателю преломления воздуха  $n$  по соотношению

$$\frac{1}{\rho} \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = c \quad (4)$$

или

$$n^2 = 1 + \frac{3}{\frac{1}{c \cdot \rho} - 1},$$

где  $c$  — постоянная величина;

$n$  — показатель преломления.

В свою очередь показатель преломления может быть определен интерференционным или теневым методом. Это далеко не полный перечень базовых соотношений.

Будем различать демонстрационный и лабораторный эксперимент. В последнем случае проводятся измерения сил, моментов сил, линейных и угловых скоростей. Демонстрационные эксперименты не предполагают измерений, но в аэромеханике они многочисленны и обширны — от эффектов Бернулли и Магнуса до эффектов Бифельда — Брауна и Коанда. Также в жидкости легко воспроизводится вихревая дорожка Кармана, а в дымах — образование вихрей (вихревая пушка). В основном они демонстрируют проявления закона Бернулли и могут выполняться без использования воздуходувок сколько-нибудь значительной мощности.

Прежде всего, надо организовать визуализацию потоков, важную в аэромеханике. Визуализировать поток можно дымом, нитями, бумажными полосками. Поток воздуха может создаваться пылесосом, вентилятором или специальной воздуходувкой. В ряде экспериментов важна мощность потока.

Полезно для ориентировки пользоваться следующими соотношениями. Скорость потока определяется числом оборотов двигателя и его мощностью  $P_0$ :

$$v^3 = \frac{2P}{\pi r^2},$$

где  $\rho$  — плотность воздуха;  
 $r$  — радиус лопастей.

Мощность, затрачиваемая на вращение крыльчатки, описывается формулой

$$N = \beta \rho n^3 d_b^5, \quad (5)$$

крутящий момент на валу

$$M = \frac{\beta}{2\pi} \rho n^2 d_b^5, \quad (6)$$

где  $N$  — момент сил, действующих на лопасть;

$n$  — частота вращения, Гц;

$d_b$  — диаметр лопастей;

$\rho$  — плотность воздуха;

$\beta$  — коэффициент мощности (среднее значение 0,2–0,4).

Весьма интересны эксперименты, демонстрирующие регулярные вихревые течения. Достаточно просто изготовить вихревую пушку, которая представляет собой параллелепипед, один торец которого затянут гибкой мембраной, а противоположный — жесткий с небольшим отверстием. Объем заполняется дымом для визуализации газовых потоков. Ударяя по гибкой мембране, на выходе из отверстия получаем кольцевой вихрь. Следует отметить, что результат эксперимента сильно зависит от силы и продолжительности удара по мембране. С помощью вихревой пушки можно изучать взаимодействие кольцевых вихрей. Для этого делают два выходных отверстия с возможностью изменять расстояние между ними и даже их диаметры. Проще всего использовать сменные пластины с отверстиями, помещаемые в кассету. В литературе и интернет-источниках описано много экспериментов с вихревой пушкой.

Регулярные вихри образуются и при обтекании длинных цилиндрических тел, ось которых перпендикулярна скорости равномерного потока воздуха. Визуализировать вихревую дорожку (дорожку Кармана) затруднительно, но легко слышать. Длинные провода, обтекаемые равномерным потоком воздуха, издают звук. Он генерируется последовательным срывом вихрей с этих проводов, что и вызывает их колебания. Явление известно давно и носит название «зола арфа».

Не менее интересны механизмы образования смерчей. Заметим, что в природе смерч представляет серьезную угрозу для легкой авиации. Смерч довольно просто воспроизвести. Над широкой емкостью с горячей (кипящей) водой помещают вентилятор, работающий на вытяжку. Возникает столб влажного воздуха, который слегка закручивается. Визуализировать это движение воздуха проще всего дымом, но часто достаточно поднимающегося пара.

Еще проще демонстрировать смерч с помощью воды. Берем две двухлитровые пластиковые бутылки и одну из них заполняем водой. Перекрываем горлышко бутылки шайбой с небольшим отверстием и герметично пристыковываем ко второй пустой бутылке.

Переворачиваем связку так, чтобы бутылка с водой оказалась наверху. Когда вода начинает перетекать в нижнюю пустую бутылку, закручиваем установку вокруг вертикальной оси. В верхней бутылке образуется смерч.

Не следует полагать, что в области вихревых течений все исследовано и используется. Недавно российскими учеными был обнаружен эффект образования двойного вихревого жгута при течении газов и жидкостей. Этот эффект проявляется при сжигании угля в вихревой топке. Изучение явления позволит выяснить, как стабилизировать горение, повысить полноту сгорания и уменьшить концентрацию вредных выбросов.

Во всех экспериментах критична скорость потоков. Регулировать ее проще всего изменением числа оборотов двигателя воздуходувки. Отметим, что лабораторные воздуходувки плохо приспособлены для создания потоков, необходимых для некоторых экспериментов, например, с эффектом Магнуса: не хватает мощности. То же касается измерения скорости потока: стандартные лабораторные (учебные) ареометры весьма несовершенны. Однако целый ряд экспериментов можно провести и со слабыми потоками. В слабых потоках (малые числа Рейнольдса) при ламинарном обтекании можно демонстрировать, что осесимметричные тела не испытывают сопротивления (эффект Даламбера).

Простейшие и весьма наглядные эксперименты с потоком воздуха — диск Рэлея, свободно вращающийся вокруг вертикальной оси [1]. Зафиксировав этот диск в положении, при котором его плоскость перпендикулярна потоку, мы получаем установку для наблюдения явления «подсасывания». Пламя свечи, стоящей за обдуваемым диском, отклоняется в сторону диска.

Явление «подсасывания» можно организовать по-другому. На стол набрасываются легкие бумажки, которые накрываются жестким листом (картон, тонкий дюраль), испещренным отверстиями. Один конец этого листа свешивается со стола. Производится резкий удар рукой по свободно свисающей части листа. Бумажки со стола движутся вверх в направлении движения поднимающейся стороны листа. Наличие большого числа мелких отверстий демонстрирует, что через них воздух не проходит в силу своей вязкости.

Поведение струи воздуха или жидкости может быть весьма странным. В некоторых случаях струя вдруг прилипает к поверхности твердого тела и обтекает его весьма странным, непредсказуемым образом. Таково иногда вытекание струи воды из чайника (эффект чайника). В научной литературе применяют термин «эффект Коанда». Сегодня эффект Коанда используется при разработке двигателей для аппаратов на воздушной подушке и судов с подводными крыльями, для повышения тяги реактивных сопел, для торможения самолетов при посадке и для глушения шума реактивных двигателей. Демонстрировать этот эффект весьма удобно, выпустив струйку воды из крана на стеклянную палочку. Траектории струй, текущих по палочке, зависят от ее наклона и весьма трудно предсказуемы.

Весьма просто организовать демонстрацию эффекта Бернулли на примере шарика, а также полосок бумажки.

Рассматривается шарик, парящий в струе газа. Для этого достаточно использовать насадку (удлинитель) из комплекта пылесоса. Если срезать верхний торец насадки под косым углом, то теннисный шарик не только парит в струе, но и вращается в определенном

направлении относительно оси, перпендикулярной скорости потока.

Весма просто меняет профиль сечения струи. Для этого насадку сжимают в выходном сечении. С такой струей легко демонстрировать притяжение двух параллельных полосок бумаги, между которыми продувается воздушная струя. Это очень наглядная и убедительная демонстрация давления в струе.

У курсантов вызывают интерес явления, связанные с движением винта (пропеллера), особенно, если пропеллеры сделаны самостоятельно. Простейший пропеллер делается из квадратного листа бумаги, который разрезается по диагоналям в направлении центра, но не до конца. Затем полученные лепестки загибаются одним краем к центру квадрата и прокалываются гвоздем по центру. Этот гвоздь является осью вращения. Получается вертушка. Ставится задача определить, в каком направлении она будет вращаться при ее поступательном движении в направлении оси.

Более интересная вертушка получается из двух скрещенных планок, скошенных по толщине, каждая навстречу друг другу. После этого две планки соединяются, образуя крест. При этом все точки «плеча» должны быть скошены по направлению кругового оборота. В результате получается четырехлопастный пропеллер. Он тоже вращается под действием набегающего потока воздуха, но гораздо интереснее с его помощью исследовать явление авторотации. Для этого необходимо ось пропеллера утяжелить и отпустить устройство, предоставив ему возможность падать вертикально вниз. Вращение замедляет падение.

Течение газа часто сопровождается различными тепловыми эффектами. Таков эффект Прандтля — Глоерта: появление конусообразного облака конденсата, возникающего вокруг объекта, движущегося в воздухе со скоростью, близкой к скорости звука. Причина — появление скачков уплотнения в тех местах тела, где локальная скорость превышает скорость звука. Возникающий по причине вязкости воздуха градиент давления в пограничном слое приводит к срыву течения. Этот процесс является адиабатическим, занимаемый воздухом объем увеличивается, его температура понижается и может оказаться ниже точки росы. Водяной пар конденсируется, и образуется наблюдаемый туман. По мере удаления от фронта ударной волны температура повышается до температуры невозмущенного потока, и конденсат испаряется. Создается впечатление, что облако тумана следует за самолетом. Подобный эффект можно наблюдать при выходе пара из кипящего чайника: вблизи носика струя пара невидима, но на некотором расстоянии, порядка сантиметра, образуется конденсат — белое облако тумана, которое на удалении исчезает.

Также хорошей оптической демонстрацией является изменение показателя преломления воздуха в зависимости от температуры. Показатель преломления пропорционален давлению. Подогретый воздух движется вертикально вверх и сбоку подсвечивается лучом от детского проектора для фильмов. На стенке в затемненном помещении видны темные и светлые пятна — результат наложения прошедших световых лучей через области воздуха с разными показателями преломления.

Большое значение при демонстрациях имеет акцентирование внимания курсантов на практическом использовании демонстрируемых явлений. Втягива-

ющее действие струи воздуха используется в пульверизаторах, краскопультах и водоструйных насосах. Необходимо продемонстрировать пульверизатор и отметить, что водоструйный насос прост по устройству, имеет большую производительность и не содержит движущихся частей. Однако создать большее разрежение он не может.

В авиации неприятными происшествиями являются столкновения летательных аппаратов с птицами. Хорошей моделью этого процесса может служить гидравлический удар тела с упруго-вязко-пластическими свойствами о твердую преграду. Как известно, оценка ударного давления (давления Гюгонио) дает  $P_{\max} = \rho v_1 v$ , где  $\rho$  — плотность материала (птицы),  $v_1$  — скорость ударной волны,  $v$  — скорость налетающего тела (птицы) [1]. Продемонстрировать этот процесс можно простым способом. Заполните пластиковую бутылку полностью водой и закройте пробкой с небольшим отверстием, пробитым шилом. Бросим бутылку с некоторой небольшой высоты на твердую поверхность. Вода из отверстия выбросится вверх на высоту, значительно превышающую ту, с которой уронили бутылку. Верхняя граница высоты может быть оценена по формуле

$$h = \frac{P_{\max}}{\rho g} = \frac{\rho v_1 v}{\rho g} = \frac{v_1 v}{g}. \quad (7)$$

Скорость падающего тела  $v = \sqrt{2gh_0}$ , где  $h_0$  — высота, с которой падает бутылка. Отсюда скорость ударной волны

$$v_1 = \frac{gh}{v} = \frac{gh}{\sqrt{2gh_0}} = \frac{\sqrt{gh}}{\sqrt{2h_0}}. \quad (8)$$

Аэродинамические силы доступнее всего демонстрировать и изучать с помощью колебаний. Наличие аэродинамических сил показывают посредством маятника Обербека (крестообразный физический маятник). Он используется обычно для представления зависимости периода колебаний от момента инерции, а также от положения центра масс маятника. Этот прибор с широкими возможностями можно использовать для демонстрации действия аэродинамических сил. Для этого на концах стержней с подвижными грузами необходимо установить насадку с укрепленной на ней плоскостью из тонкого дюрала. Насадка может поворачиваться на 90 градусов и фиксироваться в крайних положениях. Установив лопасти в плоскости крестовины, можно изучить влияние сил вязкости воздуха на затухание маятника. Повернув лопасти перпендикулярно плоскости крестовины, будем изучать влияние аэродинамических сил на затухание колебаний. Трудность состоит в том, что для описания колебаний необходимо определить не силы, а моменты этих сил в условиях, когда скорость воздушного потока неодинакова по поверхности лопасти. Поэтому для демонстрации можно считать, что эти распределенные силы приложили суммарно в геометрическом центре пластин и равны средним значениям сил, действующих на ближнем и удаленном от центра вращения расстояниях.

Практически важные вопросы обтекания тел исключены из лабораторного эксперимента, кроме эксперимента по определению коэффициента затухания физического маятника под действием сил сопротивления воздуха.

Мы хотим обратить внимание на простые и изящные эксперименты, позволяющие глубоко понять механизм воздействия аэродинамических сил на характер движения тел. К сожалению, доступный для учебной лаборатории эксперимент с измерениями немногочисленный.

Представляется, что наиболее простой и доступной является работа по изучению затухающих колебаний маятника с шаром на длинном подвесе (математический маятник). Рассмотрим более подробно условия эксперимента. Учитывая, что характер обтекания шаров зависит от состояния их поверхности и массогабаритов, сравнивались шары из различных материалов. Вначале была разработана установка из двух математических маятников, содержащая бронзовый шар массой 120 г и алюминиевый шар массой 40 г. Диаметр обоих шаров составляет 30 мм. Для сохранения плоскости колебаний шары подвешивались на бифилярном подвесе длиной 2250 мм. Расстояние между подвешенными шарами составляло 435 мм. Такое расстояние позволяет исключить влияние движения одного шара на характер движения другого. Для того, чтобы облегчить отсчет амплитуд колебаний, движение шаров проецировалось на экран с делениями посредством проекционного аппарата с углом расходимости луча 6°. Расстояние от дальнего шара до экрана составляло 1,5 м. При отклонении маятников на малый угол максимальная среднеквадратичная скорость движения шаров составляла примерно 1 м/с, что соответствует числу Рейнольдса порядка 300. Как правило, при таких числах Рейнольдса обтекание шара считают почти ламинарным, и силу сопротивления можно оценить по формуле Стокса. Сравнивая экспериментальные данные по затуханию колебаний с результатами расчета, можно сделать выбор между моделями сил сопротивления.

Первоначально предполагалось определять характеристики колебательного процесса методом сравнения. Поэтому подвешивались одновременно два шара. Начальные углы отклонения маятников выбирались менее 5°, чтобы исключить влияние амплитуды на период колебаний. Однако обнаружилось наличие связи между маятниками. Были предприняты меры, исключаяющие такую связь. Подвес маятников осуществлялся на кронштейне, исключаяющем его кручение и иные деформации при колебаниях шаров. Вторая проблема – подвес шаров. Он должен быть выполнен так, чтобы исключить вращательные движения шара. Третья проблема состоит в получении поверхности выполненных из разных материалов шаров одинакового качества. В пределах разумного эти проблемы были решены. Существовала опасность, что на движении шаров скажется близость поверхности стола, над которым двигались маятники. Однако влияние поверхности экспериментально не обнаруживалось. Эксперимент проводился в несколько этапов.

На первом этапе проверялось отсутствие связи между маятниками. Для этого оба маятника из одного и того же материала отклонялись от положения равновесия на одинаковый угол, и наблюдалось их затухание. При этом определялся период колебаний и коэффициент затухания. По этим величинам рассчитывался момент сил трения (сопротивления). Первоначально ответственными за затухание считались только вязкие силы. Используя формулу Стокса, уравнение движения маятника можно представить в виде

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{6\pi\eta R}{mL} \frac{d\varphi}{dt} + \frac{g}{L} = 0, \quad (9)$$

$$2\beta = \frac{6\pi\eta R}{mL}, \quad \omega_0^2 = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = \frac{g}{L},$$

где  $\varphi$  – угол отклонения маятника от вертикали;

$\eta$  – вязкость воздуха;

$R$  – радиус шара;

$m$  – масса шара;

$L$  – длина подвеса;

$g$  – ускорение силы тяжести;

$\beta$  – коэффициент затухания;

$\omega_0$  – собственная частота колебаний;

$T$  – период.

Как видим, коэффициент затухания тем меньше, чем больше масса шара, и он не зависит от начальных условий.

Прежде всего, проверялась зависимость периода колебаний от длины подвеса. Экспериментально коэффициент затухания определяли по соотношению

$$\beta = -\frac{\ln \frac{\Phi_n}{\Phi_0}}{nT}, \quad (10)$$

где  $\Phi_n$  – амплитуда отклонения маятника в периоде с номером  $n$ ;

$\Phi_0$  – начальное отклонение маятника;

$T$  – период колебаний, определенный экспериментально.

На втором этапе начальные углы отклонения маятников одинаковых радиусов выбирались разными, причем такими, чтобы начальная энергия обоих маятников из различных материалов была одинаковой. Эксперимент однозначно подтверждает меньшее затухание колебаний тяжелого шара в сравнении с легким. Однозначно и с хорошей точностью во всех экспериментах подтверждается теоретическая формула для периода колебаний. Имеется большое различие в величинах коэффициентов затухания. Соотношение, полученное по Стоксу

$$\frac{\beta_1}{\beta_2} = \frac{m_2}{m_1}, \quad (11)$$

не выполняется. Если отношение масс равно трем, то отношение измеренных коэффициентов затухания почти в 2,5 раза больше. Таким образом, колебания легкого шара затухают гораздо быстрее, чем следует из модели ламинарного обтекания. Причем, начальные условия, как следует из второго эксперимента, это соотношение не изменяют. И в этом случае зависимости коэффициентов затухания от массы и радиуса качественно подтверждаются.

Для проверки зависимости коэффициента затухания от радиуса были изготовлены два шара из дерева и свинца с различными радиусами. Деревянный шар имел массу 188,6 г и диаметр 92,7 мм, а свинцовый, соответственно, 182,0 г и 32,1 мм. Как видим, отношение радиусов шаров составляет 2,89. В этом случае начальная энергия шаров при одинаковых углах отклонения была одинаковой. Эксперимент подтвердил зависимость коэффициента затухания от радиусов. В количественном отношении вместо 2,89 получено 2,3, т. е. значительно больше. Таким образом, опять подтверждается недостаточность модели вязкого трения при описании затухания.

Рассматривались и другие, невязкие механизмы диссипации энергии. Прежде всего, следует учесть трение в подвесе. Однако момент сил трения пропорционален массе, и тогда общий коэффициент затухания не должен сильно зависеть от массы шаров, что противоречит эксперименту.

Второй возможный механизм потерь энергии – механический гистерезис – потери энергии за счет необратимых деформаций нитей подвеса. Зависимость силы натяжения нити подвеса математического маятника от угла отклонения от положения равновесия  $\varphi$  хорошо известна (без учета затухания):

$$N = mg(3 \cos \varphi - 2 \cos \Phi_0). \quad (12)$$

Здесь  $\Phi_0$  – начальный угол отклонения маятника;  $\varphi = \Phi_0 - \omega t$ . Как видно, чем меньше угол отклонения, тем больше сила натяжения.

В этом случае потери энергии пропорциональны массе шара, что не согласуется с экспериментом.

Упругий гистерезис при колебаниях проявляется в том, что в начале, при больших амплитудах, убывание амплитуд происходит более быстро, чем при малых. В установке до полного затухания маятники совершают примерно 300 колебаний за 15 минут, так что этот эффект, в принципе, можно обнаружить. Однако на данном этапе вопрос не рассматривался, поскольку для повышения точности необходимо увеличивать период колебаний и, соответственно, отклонение шаров.

Механизм сопротивления движению тел в воздухе гораздо сложнее принятого в общих курсах [1]. При малых числах Рейнольдса ( $Re < 1$ ) известна формула Буссинеска [2], содержащая поправки к формуле Стокса для вязкого сопротивления:

$$\vec{F} = -6\pi\mu R\vec{v}(t) - \frac{2}{3}\pi\rho R^3 \frac{d}{dt}\vec{v}(t) - 6\pi\mu R^2 \frac{1}{\sqrt{\pi\nu}} \int_0^t \frac{d}{d\tau}\vec{v}(\tau) \frac{d\tau}{\sqrt{t-\tau}}, \quad (13)$$

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Общая физика. Практикум: учеб. пособие для студ. физико-мат. спец. учреждений, обеспечивающих получение высш. пед. образования / В. А. Бондарь [и др.]; под общ. ред. В. А. Яковенко. – Минск : Вышэйшая школа, 2008. – 572 с.
2. Лекционный эксперимент по физике / М. А. Грабовский, А. Б. Млодзеевский [и др.]; под ред. В. И. Ивероновой. – Москва : Наука, 1972. – 639 с.
3. Руководство к лабораторным занятиям по физике / Л. Л. Гольдин, Ф. Ф. Игошин [и др.]; под ред. Л. Л. Гольдина. – Москва : Наука, 1973. – 687 с.
4. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – Москва : Наука, 1970. – 904 с.
5. Заворотнов, В. А. От идеи до модели / В. А. Заворотнов. – Москва : Просвещение, 1988. – 160 с.
6. Семенов, М. В. Методика и техника лекционных демонстраций по физике / М. В. Семенов, А. А. Якута. – Москва : Издательство МЦНМО, 2019. – 608 с.

## REFERENCES

1. Bondar V.A. [et al.] General Physics. Workshop: a textbook for studying. physics and mathematics special. institutions, ensuring the receipt of higher. ped. Education; under the general editorship of V.A. Yakovenko. Minsk, Higher School, 2008, 572 p.
2. Grabovsky M.A., Mlodzeevsky A.B. [et al.] Lecture Experiment in Physics; edited by V.I. Iveronova. Moscow, Nauka, 1972, 639 p.
3. Goldin L.L., Igoshin F.F. [et al.] Guide to laboratory classes in physics; edited by L.L. Goldin. Moscow, Nauka, 1973, 687 p.
4. Loitsyansky L.G. Mechanics of liquids and gases. Moscow, Nauka, 1970, 904 p.
5. Zavorotnov V.A. From idea to model. Moscow, Prosveshchenie, 1988, 160 p.
6. Semenov M.V., Yakuta A.A. Methodology and technique of lecture demonstrations in physics. Moscow, MCNO Publishing House, 2nd edition, 2019, 608 p.

где  $\mu, \nu$  – коэффициенты динамической и кинематической вязкости,  $\rho$  – плотность жидкости. В формуле (13) первое слагаемое – сила Стокса, сила сопротивления; второе слагаемое приводит к понятию присоединенной массы и содержит первую производную от скорости, то есть ускорение. Третье слагаемое – сила Басе, связана с предысторией движения. В ней учтено влияние присоединенной массы и нестационарности движения. Однако она получена для прямолинейного движения.

Таким образом, в эксперименте действительно обнаруживаются эффекты, обусловленные присоединенной массой и нестационарностью.

Ввиду того, что возможности установки ограничены, на данном этапе не представляется возможным сделать однозначный вывод о вкладах механизмов затухания. Прежде всего, следует повысить точность отсчета амплитуд колебаний. В работе такой отсчет производился теньвым методом – проекцией колеблющихся шаров на экран. Однако параллельность проекционного пучка лучей была неудовлетворительной, что могло существенно исказить измеряемую величину коэффициента затухания. Поэтому нами создана проекционная установка с углом расходимости светового пучка менее  $5^\circ$ .

В дальнейшем установка будет усовершенствована, и исследования продолжены. Полученные результаты позволяют утверждать, что установка с колеблющимися шарами вполне пригодна для лабораторного эксперимента.

## Заключение

Отличительной чертой аэромеханики является тот факт, что при малых изменениях какого-либо параметра происходит коренная перестройка взаимодействия воздушного потока с обтеканием объектов. В этом состоит принципиальная трудность аэродинамического эксперимента. Поэтому при обучении принципиально всемерно расширять арсенал демонстрационных, лекционных, лабораторных и иных экспериментов.

Статья поступила в редакцию  
22.08.2025

# ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКЕ ДИСПЕТЧЕРОВ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ

## ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF USING A DECISION SUPPORT SYSTEM IN PROFESSIONAL TRAINING OF AIR TRAFFIC CONTROLERS

**Скрыпник Олег Николаевич** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры организации движения и обеспечения безопасности на воздушном транспорте учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь  
skripnikon@yandex.ru

**Oleg Skripnik** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Traffic Organization and Air Transport Safety of the Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus  
skripnikon@yandex.ru

**Мацкевич Анна Михайловна** – заместитель декана учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь  
krukovich.am@gmail.com

**Anna Matskevich** – Deputy Dean of the Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus  
krukovich.am@gmail.com

**Аннотация:** статья посвящена научному обоснованию оценки качества подготовки диспетчера по организации воздушного движения с использованием системы поддержки принятия решений. В работе актуализируется необходимость повышения эффективности и объективности мониторинга профессиональных компетенций диспетчеров по организации воздушного движения в условиях цифровизации. Выделены ключевые компетенции, динамика прироста которых поддается формализации: понимание авиационной фразеологии, скорость реакции, точность передачи информации, уровень владения английским языком. Аргументируется выбор данных компетенций на основе анализа нормативных требований, типичных ошибок диспетчеров и инцидентов, а также практики применения интеллектуальных симуляционных систем. Представлены возможности интеграции математических моделей для обеспечения прозрачности, воспроизводимости и объективности оценки уровня профессиональной подготовки. Описаны эффекты внедрения автоматизированных средств контроля и формирования индивидуализированных траекторий обучения в целях снижения влияния человеческого фактора и повышения безопасности полетов.

**Ключевые слова:** диспетчер по ОрВД, профессиональная подготовка, система поддержки принятия решений (СППР, DDS), компетенции, фразеология радиообмена, безопасность полетов, гражданская авиация.

**Abstract:** the article is devoted to the scientific substantiation of the assessment of the quality of training of an air traffic controller (ATM) using a decision support system (DSS). The paper highlights the need to improve the efficiency and objectivity of monitoring the professional competencies of air traffic controllers in the context of digitalization. Key competencies are identified, the growth dynamics of which can be formalized: understanding of aviation phraseology, reaction speed, accuracy of information transfer, level of English proficiency. The choice of these competencies is substantiated based on the analysis of regulatory requirements, typical errors of controllers and incidents, as well as the practice of using intelligent simulation systems. The possibilities of integrating mathematical models to ensure transparency, reproducibility and objectivity of assessing the level of professional training are presented. The effects of introducing automated control tools and forming individualized training trajectories in order to reduce the influence of the human factor and improve flight safety are described.

**Keywords:** air traffic controller, professional training, decision support system (DSS, DDS), competencies, radio phraseology, flight safety, civil aviation.

### Введение

В гражданской авиации особое внимание традиционно уделяется обеспечению безопасности

полетов и эффективности функционирования системы организации воздушного движения (ОрВД). Профессиональная подготовка диспетчеров ОрВД напрямую влияет на эффективность и качество управления

воздушным движением, своевременность принятия решений и предотвращение чрезвычайных ситуаций, что подтверждается многочисленными исследованиями и нормативными актами [1].

Рост интенсивности воздушного движения, внедрение новых технологий и повышение требований к компетентности специалистов создают необходимость модернизации методик обучения и оценки компетенций диспетчеров. Традиционные формы и методы профессиональной подготовки постепенно уступают место компетентностно-ориентированным моделям, интегрированным с инновационными образовательными технологиями и интеллектуальными системами поддержки принятия решений (СППР) [3].

Международная практика подготовки диспетчеров ОрВД базируется на компетентностной модели ИКАО, описанной в документах Doc 10056 и Doc 9941. Подход ИКАО ориентирован на формирование набора компетенций, необходимых для обеспечения безопасности и эффективности воздушного движения, с акцентом на развитие специфических знаний, умений и навыков, измеряемых через стандартизированные процедуры и критерии [4].

Такой подход реализован, например, в Российской Федерации, когда профессиональная подготовка диспетчеров строится на интеграции федеральных государственных образовательных стандартов с международными рекомендациями ИКАО. Центры авиационного образования внедряют компетентностно-ориентированные технологии, электронные образовательные порталы и облачные сервисы для формирования адаптивных, индивидуализированных учебных траекторий [5].

Цифровизация учебного процесса становится ключевым элементом современной методики обучения. Внедрение электронных учебных комплексов, симуляторов, дистанционных платформ и автоматизированных систем мониторинга и коррекции образовательных траекторий активно поддерживается авиационным образовательным сообществом [6, 7]. При этом международные и национальные образовательные стандарты учитывают роль нормативных документов: программ ИКАО, стандартов, законов и регламентов, которые определяют содержание подготовки, квалификационные требования, процедуры лицензирования и принципы обеспечения безопасности полетов.

В рамках настоящего исследования рассматривается разработка и внедрение методов математического моделирования в процесс профессиональной подготовки диспетчеров ОрВД с использованием интеллектуальных алгоритмов поддержки принятия решений. Основное внимание уделяется методике и принципам интеграции системы поддержки принятия решений в образовательную среду для повышения оперативности и обоснованности принимаемых решений о достижении заданных показателей освоения компетенций, а также оптимизации обучения при реализации компетентностного подхода [8 – 10].

Предметом работы является формирование цифровой модели профессиональной подготовки диспетчеров по ОрВД и внедрение интеллектуальных инструментов для автоматизации, коррекции и управления образовательным процессом в соответствии с международными стандартами и рекомендациями ИКАО.

Цифровой двойник процесса обучения – это виртуальная модель образовательного процесса, соз-

данная с целью анализа, оптимизации и повышения эффективности традиционного обучения. Цифровой аналог позволяет учитывать различные аспекты учебного процесса, такие как:

1. **Моделирование учащихся:** создание профилей курсантов с учетом индивидуальных особенностей, уровня подготовки, мотивации и предпочтений.

2. **Мониторинг прогресса:** отслеживание успеваемости каждого курсанта, выявление проблемных областей и рекомендации по коррекции траектории обучения.

Преимущества использования цифровых двойников:

- повышение качества образования путем персонализации подходов к обучению;
- возможность предсказывать успешность различных стратегий обучения;
- улучшение организации учебного процесса и повышение продуктивности педагогов;
- уменьшение затрат на экспериментальные методы исследования образовательных методик.

Цифровой двойник представляет собой мощный инструмент для модернизации системы образования, способствующий повышению ее эффективности и адаптации к современным требованиям общества.

Таким образом, актуальной научной проблемой становится разработка и апробация математической модели и алгоритма, обеспечивающего автоматизацию процесса подготовки диспетчеров ОрВД и оперативную коррекцию образовательных траекторий на основе компетентностного подхода, цифровых платформ и интеграции нормативных требований ИКАО, национального регулятора, а также национальных образовательных стандартов.

## Обзор научной литературы

Развитие авиационной отрасли на современном этапе сопровождается стремительным усложнением технологических процессов и расширением сферы международного взаимодействия, что предъявляет все более строгие требования к компетентности диспетчеров по ОрВД. Возрастает значимость внедрения интеллектуальных систем поддержки принятия решений (Decision Support Systems, DSS) в процессы профессиональной подготовки авиационных специалистов [7, 8]. Международные исследования показывают эффективность применения объектно-ориентированных подходов и адаптивных технологий в авиационном образовании [3].

В работах российских ученых подчеркивается необходимость системного подхода к обучению и управлению авиационным персоналом. Е. В. Марьянкин рассматривает авиационный персонал как сложную управляемую систему и предлагает методологию оценки его состояния с использованием методов системного анализа и имитационного моделирования [6]. В. В. Желтухин обосновывает необходимость перехода к использованию технических средств обучения и компьютерных технологий при подготовке летного состава, что позволяет обеспечить адаптивность образовательного процесса и его приближение к реальным условиям деятельности [7].

О. Г. Захарова разрабатывает функциональную модель организации профессиональной подготовки летного состава, основанную на принципах ком-

петентностного подхода, а также интеграции автоматизированных систем обучения и симуляторов в образовательный процесс [2, 8]. А. Ю. Букалова и В. А. Харитонов предлагают алгоритмы интеллектуальной поддержки принятия решений в задачах управления уровнем профессиональной подготовки, с применением методов комплексного оценивания и локализации проблемных зон в обучении [9].

А. Е. Коновалов и Ю. А. Юркин подчеркивают, что современные системы ОрВД нуждаются в автоматизированных инструментах прогнозирования и рекомендаций, снижающих когнитивную нагрузку на диспетчера и повышающих эффективность работы в условиях ограниченного времени [10].

Актуальность темы подтверждается и в международных документах. Согласно положениям ИСАО Doc 4444, эффективность диспетчерского обслуживания напрямую связана с уровнем подготовки персонала и внедрением технологий, способствующих стандартизации процедур, включая речевое взаимодействие (фразеологию) [4].

В современной зарубежной научной среде наблюдается стремительное развитие систем поддержки принятия решений (DSS), ориентированных на существенное повышение качества подготовки диспетчерского персонала. Zuluaga-Gomez совместно с группой исследователей разработали виртуального симулятора-пилота, основанного на алгоритмах автоматического распознавания речи и генерации авиационной фразеологии. Этот интеллектуальный агент способен обеспечивать высокореалистичное моделирование радиообмена, что открывает беспрецедентные возможности для отработки критически важных навыков диспетчеров в условиях, максимально приближенных к реальным операционным сценариям [10]. Такая функциональность позволяет достичь более глубокого усвоения навыков и повышения общей компетентности специалистов. Потенциал данной технологии для образовательных методик в авиационной отрасли представляется весьма значительным.

Ghosh применил ансамблевую модель глубокого обучения с подкреплением для прогнозирования и разрешения конфликтов воздушного движения, реализуя возможности DSS в симуляционной среде Eurocontrol [12]. Модель Vouros и Bastas (G-conv-RL) акцентирует внимание на обеспечении интерпретируемости решений и точности рекомендаций, формируемых системой.

Исследование Bastas и Vouros демонстрирует возможность предсказания реакции диспетчера на потенциальные конфликты, что открывает перспективы адаптивного управления учебными ситуациями в тренажерной среде [13]. На практическом уровне Falk подчеркивает необходимость интеграции AI-инструментов в реальные диспетчерские процессы при условии сохранения экспертной роли человека. Аналогичный подход реализуется в британской системе Aimee, используемой NATS в аэропорту Хитроу, где DSS повышает ситуационную осведомленность и помогает управлять плотным трафиком.

В стандартах ИСАО подчеркивается значимость компетентностного и адаптивного подхода, позволяющего свести к минимуму риски неверных решений в условиях стресса и неопределенности, характерных для профессии диспетчера ОрВД. Важной задачей современного образования становится обеспечение

не только высокой точности усвоения стандартных процедур радиообмена, но и развитие критических компетенций — адаптивности, скорости реакции, устойчивости к ошибкам и способности оперативно реагировать на нестандартные ситуации [14].

Таким образом, совокупность проводимых в авиационном образовании исследований подтверждает высокую актуальность темы, связанную с внедрением DSS в профессиональную подготовку диспетчеров УВД. Это направление позволяет решать задачи адаптации обучающихся, повышает надежность решений и снижает вероятность ошибок в условиях реального времени и высокой нагрузки.

### **Структура системы поддержки принятия решений в профессиональной подготовке диспетчеров по организации воздушного движения**

Методика разработки СППР для организации процесса профессиональной подготовки и оценки качества подготовки авиационных диспетчеров опирается на интеграцию системного и объектно-ориентированного подходов, что обеспечивает гибкость, масштабируемость и воспроизводимость системы. Основной целью является обеспечение объективной, воспроизводимой и прозрачной оценки профессиональных компетенций с учетом индивидуальных особенностей обучающихся и динамики образовательного процесса [8].

Компетентностный подход предусматривает формализацию ключевых профессиональных качеств диспетчеров: понимание авиационной фразеологии, скорость реакции, точность передачи информации, уровень владения английским языком — в качестве критических метрик, поддающихся прямому мониторингу и оценке.

Воспроизводимость и прозрачность обеспечивает интеграцией дискретно-математических моделей (методы линеаризации и декомпозиции) для агрегирования оценочных данных, обратной декомпозиции и адресного управленческого воздействия [8].

СППР построена как многокомпонентная модульная структура, где каждый модуль представляет собой отдельный этап мониторинга, анализа и коррекции качества подготовки диспетчера по ОрВД (таблица 1).

СППР реализуется по принципу объектно-ориентированных систем, когда каждый обучающийся агрегирует набор признаков компетентности, отслеживаемых в процессе обучения путем тестирования. Система оценивания динамически обновляется, а принятые алгоритмы позволяют обеспечивать прозрачность, объективность и статистическую достоверность результатов, способствуя минимизации влияния субъективного фактора и человеческих ошибок.

### **Выбор компетенций для оценки качества профессиональной подготовки диспетчера по организации воздушного движения**

В работах по методологии профессионального обучения в гражданской авиации [2, 6 — 9] дается определение компетенции: «Компетенция — интегративная характеристика, объединяющая знания, умения, навыки и профессиональное мышление — рассматривается как ключевой элемент системы управления профессиональной подготовкой авиационного персонала». В трудах Г. К. Захаровой компетентностная модель об-

Таблица 1 – Компоненты системы поддержки принятия решений

Компонент системы	Функция и назначение
Модуль сбора данных	Автоматизация сбора оценочных, симуляционных и тестовых данных, фиксация событий, ошибок, успешных действий в процессе обучения и тренажерных занятий
Модуль обработки данных	Реализация алгоритмов агрегирования, вычисление интегральных и поэлементных показателей компетентности, выявление динамики прироста навыков по каждому критерию
Модуль нормативно-правовой, экспертной базы данных	Содержит нормативные требования ИКАО, типовые сценарии, экспертные алгоритмы анализа и оценки, стандартизированные процедуры контроля качества
Модуль анализа и коррекции	Формирует индивидуальные рекомендации и сценарии корректировки образовательной траектории на основе анализа прохождения обучения, автоматизирует обратную связь между результатами мониторинга и образовательным процессом
Модуль интеграции	Связывает СППР с программным образовательным обеспечением, базами нормативных документов
Пользовательский интерфейс	Обеспечивает отображение динамики профессионального развития, визуализацию результатов оценки компетенций, выдачу рекомендаций преподавателям и обучающимся

учения рассматривается как базис для автоматизированных систем контроля [2].

В основе эффективной методики оценки качества подготовки диспетчера лежит набор компетенций, непосредственно определяющих профессионализм и безопасность работы в сфере управления воздушным движением. К таким компетенциям относятся: понимание фразеологии, скорость реакции, точность передачи информации, уровень владения английским языком. Научное обоснование выделения именно этих компетенций строится на анализе нормативных требований, особенностей профессиональной деятельности, а также эмпирических данных, полученных в ходе реализации тренажерных и симуляционных комплексов.

Понимание фразеологии радиообмена является ключевой компетенцией диспетчера ОрВД, так как она минимизирует риски интерпретационных ошибок и обеспечивает унифицированную коммуникацию между диспетчером и пилотом. Непонимание или неправильное использование фразеологических конструкций ведет к типовым ошибкам, которые могут создавать угрозы безопасности полетов, особенно в сложных или нестандартных ситуациях. Исследования [9, 12] показывают, что интеграция голосовых симуляторов с автоматическим контролем фразеологии позволяет снизить количество ошибок и ускорить овладение необходимыми навыками. Именно поэтому динамика прироста навыков по этому параметру дает объективный показатель профессио-

нального роста диспетчера и его готовности к реальным задачам.

Компетенция, которая отвечает за скорость реакции диспетчера на ситуации воздушного движения, напрямую связана с предотвращением аварийных ситуаций и поправками в прохождении воздушных судов через сложные сектора. Современные тренажерные комплексы позволяют фиксировать и анализировать не только успешность действий, но и время отклика обучающегося. Результаты исследований, представленные в [5, 9, 12], показывают, что скорость реакции является надежным индикатором общего повышения уровня компетенции, а отслеживание динамики этого показателя дает возможность адресного вмешательства в процесс обучения.

Передача информации между диспетчером и пилотом должна быть абсолютно точной, поскольку даже небольшие искажения часто становятся причиной ситуаций, приводящих к ошибочным действиям пилота или неправильному принятию решений. Примеры типовых ошибок [5, 9, 12], выявленных с помощью дискретно-математических моделей взаимодействия диспетчер – пилот, подтверждают, что точность передачи информации – один из основных элементов снижения влияния человеческого фактора. Математическая модель допускает формализацию этого показателя и его автоматическую оценку, что позволяет объективно отслеживать динамику прироста.

Английский язык – международный стандарт коммуникации в гражданской авиации (ИКАО) [1, 3, 4]. Недостаточное владение английским языком становится барьером для адекватного восприятия и передачи команд в международной авиационной коммуникации, особенно в условиях стрессовых или внештатных ситуаций. Эффективные симуляторы контроля владения языком интегрируют не только контроль лексики и грамматики, но и автоматическую фиксацию ошибок, что критично для построения объективных траекторий развития навыка [12].

Выделенные компетенции имеют общепризнанную научную и прикладную значимость, поскольку:

- входят в международные стандарты подготовки и контроля работы диспетчеров (ИКАО);
- являются составляющими типичных ошибок и инцидентов, выявляемых в ходе анализа работы ОрВД;
- позволяют объективно отслеживать совершенствование навыков с помощью современных инструментов тренажерной подготовки и интеллектуальных систем поддержки принятия решений, обеспечивая возможность динамического мониторинга и адресной коррекции образовательных программ;
- дают возможность формализации процесса оценки уровня компетенций с применением дискретно-ма-

тематических моделей и автоматизации контроля, что снижает влияние субъективности при оценивании.

Таким образом, выделение ключевых компетенций — понимания фразеологии, скорости реакции, точности передачи информации и уровня владения английским языком — в структуре математической модели оценки качества подготовки диспетчера ОрВД является научно обоснованным решением, соответствующим современным требованиям отрасли и обеспечивающим высокий уровень безопасности и эффективности функционирования системы управления воздушным движением.

### Оценка качества профессиональной подготовки диспетчеров по организации воздушного движения

Оценка качества профессиональной подготовки диспетчера ОрВД с использованием СППР представляет собой функционал, который учитывает комплексные показатели профессиональной компетентности и динамику обучения с учетом индивидуальных особенностей обучаемого. Его можно записать в виде:

$$Q = \alpha \cdot \left( \sum_{i=1}^m w_i \cdot P_i \cdot k_i^{\text{ИСППР}} \right) + \beta \cdot \left( \frac{\sum_{j=1}^m \Delta P_j \cdot \lambda_j^{\text{адапт}}}{m} \cdot \frac{T_{\text{эффект}}}{T_{\text{обуч}}} \right) + \gamma \cdot C_{\text{адапт}}, \quad (1)$$

где  $Q$  — интегральный показатель качества подготовки диспетчера;

$\alpha, \beta, \gamma$  — весовые коэффициенты, задающие относительную значимость каждого блока в общей оценке;

$m$  — число компетенций, по которым отслеживается динамика прироста навыков;

$w_i$  — весовые коэффициенты, отражающие значимость каждой компетенции;

$P_i$  — компетенции (понимание фразеологии, скорость реакции, точность передачи информации, уровень владения английским и др.);

$k_i^{\text{ИСППР}}$  — коэффициенты влияния ИСППР на соответствующую компетенцию, отражающие улучшение качества за счет поддержки системы;

$\Delta P_j$  — прирост компетенций в процессе обучения;

$\lambda_j^{\text{адапт}}$  — коэффициенты скорости адаптации навыков с помощью ИСППР;

$T_{\text{эффект}}$  и  $T_{\text{обуч}}$  — время сохранения достигнутых результатов и общее время обучения соответственно;

$C_{\text{адапт}}$  — показатель адаптивности диспетчера к нестандартным ситуациям (например, доля успешно разрешенных аварийных сценариев);

Взвешенная сумма показателей качества  $\sum w_i P_i k_i^{\text{ИСППР}}$  отражает базовый уровень профессиональных компетенций с учетом воздействия ИСППР на обучение и контроль. Например, ИСППР может повысить точность оценки или скорость усвоения материала.

Динамика обучения  $\frac{\sum \Delta P_j \cdot \lambda_j^{\text{адапт}}}{m} \cdot \frac{T_{\text{эффект}}}{T_{\text{обуч}}}$  учитывает

прогресс обучаемого в освоении навыков и способность сохранять достигнутый уровень. Коэффициенты адаптации  $\lambda_j^{\text{адапт}}$  показывают, насколько быстро и эффективно ИСППР способствует развитию каждого навыка.

Адаптивность к нестандартным ситуациям  $C_{\text{адапт}}$  является значимой компетенцией для диспетчеров, демонстрирующей умение эффективно действовать в сложных и аварийных условиях, что критично для организации безопасности полетов.

Формула позволяет комплексно оценить качество подготовки с учетом как объективных показателей, так и индивидуальной траектории развития навыков.

Весовые коэффициенты  $\alpha, \beta, \gamma$  и  $w_i$  настраиваются с учетом специфики этапа обучения, требований нормативных документов и особенностей образовательной программы (таблица 2).

Таблица 2 — Значения весовых коэффициентов

Коэффициент	Значение (пример)	Обоснование
$\alpha$	0,50	Основной вклад базовых профессиональных навыков и знаний
$\beta$	0,25	Значимость динамики обучения и прогресса
$\gamma$	0,15	Важность адаптивности к нестандартным ситуациям

Данная формула согласуется с принципами компетентностно-ориентированной подготовки, описанной в руководствах ИКАО и национальных нормативных документах [1, 3], где подчеркивается важность оценки профессионализма через показатели эффективности выполнения должностных обязанностей, а также необходимость индивидуализации обучения и постоянного мониторинга компетенций.

Таким образом, комплексный критерий интегрирует количественные показатели знаний и навыков, динамику их освоения и качество поддержки со стороны интеллектуальной системы, обеспечивая объективную и адаптивную оценку качества подготовки, персонализацию обучения, что повышает общую эффективность подготовки диспетчеров по ОрВД. Интегральный критерий учитывает комплексные показатели компетентности и динамику обучения с корректировкой индивидуальных особенностей обучаемого.

### Экспериментальная часть исследования

В рамках данного исследования была разработана и внедрена инновационная программа, призванная оптимизировать процесс обучения. Эта программа не только тщательно регистрировала каждое возникшее затруднение, но и предоставляла курсанту персонализированные рекомендации по повторному прохождению учебного модуля. Важно отметить, что при этом сохранялись все значимые параметры, характеризующие ход обучения и уровень усвоения материала.

Экспериментальная часть была направлена на эмпирическую проверку методики оценки качества подготовки диспетчеров по ОрВД с использованием СППР. В качестве объекта выступали курсанты (50 человек), проходившие обучение по дисциплине «Фра-

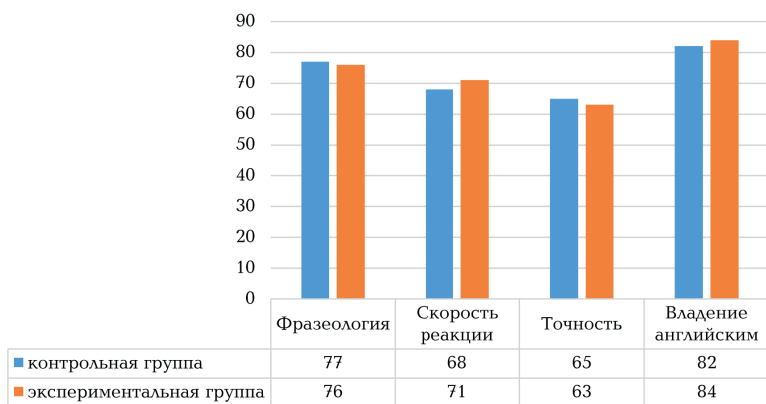


Рисунок 1 – Результаты вводной диагностики в экспериментальной и контрольной группе

зоология радиообмена на английском языке». С целью проведения сравнительного анализа эффективности различных методик, курсанты были разделены на две группы. Первая группа – контрольная (25 человек), продолжала обучение по устоявшейся, традиционной методике. Вторая группа, экспериментальная (25 человек) проходила обучение с использованием программного обеспечения с СППР.

На первом этапе эксперимента была проведена входная диагностика, которая включает в себя ком-

затраты на полное прохождение модуля; точность и полнота передачи информации в рамках заданий; а также детальный анализ допущенных грамматических и лексических ошибок, включая их частоту и общее количество.

На протяжении восьми недель курсанты обучались фразеологии радиообмена с использованием программы с ИСППР, в которую входили модули:

- стандартные ситуации радиообмена (Routine phraseology),

- нештатные и стрессовые сценарии (Emergency phraseology).

Оценивалось время прохождения модуля, корректность передачи сообщений, выполнения тестовых заданий, частота и количество грамматических и лексических ошибок.

Результаты представлялись в диаграммах динамики по всем компетенциям (рисунок 2), формировался профиль изменений для каждого курсанта. На каждом этапе обучения происходил автоматизированный сбор и анализ данных о действиях курсанта. На основании комплексной аналитики СППР автоматически формировала индивидуальные рекомендации (например: повторение теоретического материала; увеличение числа упражнений, которые отрабатывают ошибки, допущенные курсантом), которые реализовались через корректировку траектории дальнейшего обучения (адаптация сценариев, повторение слабых тем и др.). По завершении очередного цикла система собирала данные, предоставляла обратную связь по изменениям в результатах и динамике прохождения модуля.

В конце обучения была проведена повторная оценка компетенций с визуализацией прироста навыков (рисунок 3). Бокс-диаграмма показывает степень изменения каждого показателя (до/после обучения). Представлена сравнительная схема эффектив-

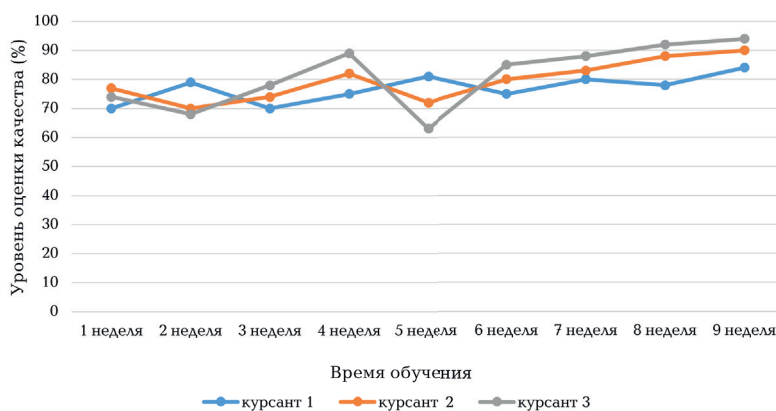


Рисунок 2 – Индивидуальная траектория обучения курсантов экспериментальной группы

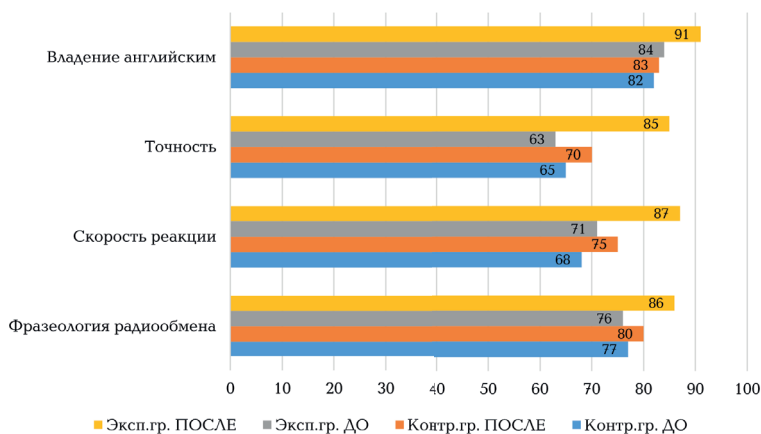


Рисунок 3 – Сравнительная диаграмма прироста компетенций в контрольной и экспериментальной группе (до и после эксперимента)

Таблица 3 – Расчет показателя качества подготовки диспетчера ОрВД

Компетенции	$P_i$ (баллы)	$w_i$	$k_i^{\text{СППР}}$	$\Delta P_j$	$\lambda_j^{\text{адапт}}$
Понимание фразеологии радиообмена	85	0,30	1,12	10	0,12
Скорость реакции	75	0,20	1,25	15	0,25
Точность передачи информации	90	0,30	1,20	12	0,18
Уровень владения английским языком	80	0,20	1,08	8	0,07

ности СППР-модели против традиционных методов обучения.

Используя предложенную методику оценки качества подготовки диспетчера ОрВД с применением СППР был произведен расчет показателя качества подготовки диспетчера ОрВД (таблица 3):

$$\begin{aligned} \sum w_i P_i k_i^{\text{СППР}} &= 0,30 \cdot 85 \cdot 1,12 + 0,20 \cdot 75 \cdot 1,25 + \\ &+ 0,30 \cdot 90 \cdot 1,20 + 0,20 \cdot 80 \cdot 1,08 = \\ &= 0,30 \cdot 95,2 + 0,20 \cdot 93,75 + 0,30 \cdot 108 + 0,20 \cdot 86,4 = \\ &= 28,56 + 18,75 + 32,4 + 17,28 = 96,99; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\sum \Delta P_j \lambda_j}{4} &= \frac{10 \cdot 0,12 + 15 \cdot 0,25 + 12 \cdot 0,18 + 8 \cdot 0,07}{4} = \\ &= \frac{1,2 + 3,75 + 2,16 + 0,56}{4} = 1,9175 \cdot \frac{9}{6} = \\ &= 1,9175 \cdot 1,5 = 2,87. \end{aligned} \quad (3)$$

Итоговый расчет:

$$\begin{aligned} PQ &= 0,50 \cdot 96,99 + 0,25 \cdot 2,876 + 0,15 \cdot 0,85 \cdot 100 + \\ &+ 0,10 \cdot 0,87 \cdot 100 = 48,495 + 0,719 + \\ &+ 12,75 + 8,7 = 70,664. \end{aligned} \quad (4)$$

Интегральный показатель качества подготовки диспетчера, расчеты которого приведены в (2) – (4), при использовании СППР ( $Q_{\text{СППР}}$ ) составляет примерно 70,7 баллов из 100. Соответственно,  $Q_{\text{безСППР}}$  рассчитывается по классической формуле взвешенной суммы показателей компетенций, без учета усиливающих коэффициентов и специальных блоков, которые были учтены в (1). Такой способ расчета – это классическая модель линейной свертки частных показателей для интегральной оценки компетентности по весовым коэффициентам, широко применяемая в педагогических, психологических и инженерных системах контроля качества подготовки [8].

Для набора исходных данных (для контрольной группы) результат  $Q_{\text{безСППР}}$  находится в пределах 58 – 60 баллов из 100, что согласуется с аналитическими и экспериментальными выводами.

### Выводы

В ходе проведенного педагогического эксперимента установлено, что при интеграции системы поддержки принятия решений в образовательный процесс по подготовке диспетчеров ОрВД достигается досто-

верный и существенный прирост по всем ключевым профессиональным компетенциям. Особо выраженный прогресс отмечен в развитии скорости реакции и точности передачи информации. Это свидетельствует о высокой степени гибкости и способности обучающихся быстро адаптироваться к цифровым и автоматизированным образовательным средам.

Важным результатом исследования стало выявление спектра латентных (скрытых) затруднений в области применения авиационной фразеологии, на которые традиционные формы контроля, основанные на экспертных оценках, не реагировали. Такой эффект подтверждает принципиальную беспристрастность и исключительную объективность автоматизированной диагностики, позволяя минимизировать влияние субъективных суждений и случайных факторов.

Внедрение автоматизированных индивидуальных рекомендаций, формируемых на основании комплексного анализа текущих достижений, обеспечило устойчивое наращивание успехов в освоении фразеологии радиообмена. Использование наглядных визуальных инструментов – схем причинно-следственных связей, динамических диаграмм, графиков прогресса – существенно повысило мотивацию обучающихся, их осознанность и активное вовлечение в процесс формирования профессиональных навыков.

Теоретико-методологическая новизна заключается в доказательстве того, что формализованная стратегия оценки с помощью СППР обеспечивает комплексность, прозрачность и воспроизводимость мониторинга динамики индивидуального роста компетенций. Визуализация процессов обучения и ошибок становится неотъемлемым инструментом для формирования точной и своевременной обратной связи, а также для значительного ускорения персонализированной коррекции образовательной траектории.

Таким образом, интеграция автоматизированных СППР в образовательную среду рассматривается как необходимое условие трансформации традиционных подходов к обучению диспетчеров по ОрВД в сторону их индивидуализации, адаптивности и повышения общей эффективности подготовки в условиях цифровизации. Полученные выводы служат основой для дальнейшего совершенствования международных стандартов, развития гибких систем автоматизированной диагностики и оптимизации образовательных практик в гражданской авиации.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Doc 10056. Manual on Air Traffic Controller Competency-Based Training and Assessment. – Montreal: International Civil Aviation Organization. – 2016. – 469 p.
2. Захарова, О. Г. Разработка модели процесса профессиональной подготовки авиационного персонала гражданской авиации Российской Федерации на основе компетентного подхода и инновационных образовательных технологий / О. Г. Захарова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14, № 4(2). – С. 613–619.
3. Shukurova, S. M. Analysis of Training Programs for the Training of Air Traffic Controllers for Determining the Field of Digitization / S. M. Shukurova, Z. Z. Shamsiev, A. Sterenharz // Technical Science and Innovation. – 2020. – Vol. 2020, Issue 1, Article 1. – P. 5–14.
4. Doc 9941 AN/478. Training Development Guide. Competency-based Training Methodology. – Montreal: ICAO, 2011. – 120 p.
5. Харитонов, В. А. Функциональные возможности механизмов комплексного оценивания с топологической интерпретацией матриц свертки / В. А. Харитонов, А. А. Белых, И. Р. Винокур // Управление большими системами. – 2007. – Вып. 18. – С. 129–140.
6. Марьенкин, Е. В. Методы оценки состояния сложной системы «авиационный персонал» в процессе управления: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е. В. Марьянкин. – М., 2014. – 19 с.
7. Желтухин, В. В. Повышение эффективности управления профессиональной подготовкой летного состава на базе разработанных технических средств обучения и компьютерных технологий: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. В. Желтухин. – СПб., 2004. – 24 с.
8. Захарова, О. Г. Повышение эффективности профессиональной подготовки летного состава на основе совершенствования моделей и средств организации обучения: дис. ... канд. техн. наук / О. Г. Захарова. – Ульяновск, 2014. – 148 с.
9. Букалова, А. Ю. Интеллектуальные инструментальные средства поддержки принятия решений в задачах управления уровнем профессиональной подготовки студентов / А. Ю. Букалова, В. А. Харитонов // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – С. 193.
10. Коновалов, А. Е. Средства поддержки принятия решения диспетчерами управления воздушным движением / А. Е. Коновалов, Ю. А. Юркин // Научный вестник МГТУ ГА. – 2013. – № 198. – С. 34–40.
11. Zuluaga-Gomez, J. P. A Virtual Simulation-Pilot Agent for Training of Air Traffic Controllers / J. P. Zuluaga-Gomez // Aerospace. – 2023. – Т. 10, № 5. – С. 490.
12. Ghosh, S. Deep reinforcement learning in service of air traffic controllers / S. Ghosh // Expert Systems with Applications. – 2024. – Т. 238. – С. 121.
13. Bastas, D. Deep Reinforcement Learning and Generative Adversarial Imitation Learning for Air Traffic Control Conflict Detection and Resolution / D. Bastas // Air Traffic Management and Systems IV. – Cham: Springer, 2023. – С. 125–147.
14. Борисов, В. Е. Разработка перспективных тренажеров, имеющих голосовую поддержку, с функцией автоматизации оценки навыков диспетчеров по управлению воздушным движением / В. Е. Борисов, В. А. Борсоев, А. А. Бондаренко // Научный вестник МГТУ ГА. – 2020. – Т. 23, №6. – С. 8–19.

**REFERENCES**

1. ICAO Doc 10056. Manual on Air Traffic Controller Competency-Based Training and Assessment. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2016, 469 p.
2. Zakharova O.G. Razrabotka modeli protsessa professional'noi podgotovki aviatsionnogo personala grazhdanskoi aviatsii Rossiiskoi Federatsii na osnove kompetentnostnogo podkhoda i innovatsionnykh obrazovatel'nykh tekhnologii [Development of a model of the process of professional training of aviation personnel of the civil aviation of the Russian Federation based on a competence-based approach and innovative educational technologies]. Izvestiya of Samara scientific center of THE Russian academy of sciences. 2012, Vol. 14, no. 4(2), pp. 613-619 (in Russian).
3. Shukurova S. Shamsiev Z.Z., Sterenharz A. Analysis of Training Programs for the Training of Air Traffic Controllers for Determining the Field of Digitization. Technical Science and Innovation. 2020. Vol. 2020, Issue 1, Article 1. pp. 5-14.
4. ICAO Doc 9941 AN/478. Training Development Guide – Competency-Based Training Methodology. Montreal, ICAO, 2011. 120 p.
5. Kharitonov V.A., Belykh A.A., Vinokur I.R. Funktsional'nye vozmozhnosti mekhanizmov kompleksnogo otsenivaniya s topologicheskoi interpretatsiei matrits svertki [Functionality of complex estimation mechanisms with topological interpretation of convolution matrices]. Upravlenie bol'shimi sistemami. 2007. Iaa. 18. pp. 129-140 (in Russian).
6. Mar'enkins E.V. Metody otsenki sostoyaniya slozhnoi sistemy «aviatsionnyi personal» v protsessse upravleniya [Methods for assessing the state of a complex "aviation personnel" system in the management process]. Abstract of Ph. D. thesis. Moscow, 2014, 19 p. (in Russian)
7. Zheltukhin V.V. Povyshenie effektivnosti upravleniya professional'noi podgotovkoi letnogo sostava na baze razrabotannykh tekhnicheskikh sredstv obucheniya i komp'yuternykh tekhnologii [Improving the efficiency of flight personnel training management based on the developed technical training tools and computer technologies]. Abstract of Ph. D. thesis. Saint Petersburg, 2004, 25 p. (in Russian).
8. Zakharova O.G. Povyshenie effektivnosti professional'noi podgotovki letnogo sostava na osnove sovershenstvovaniya modelei i sredstv organizatsii obucheniya [Improving the effectiveness of flight personnel training by improving training models and tools]. Ph. D. thesis. Ul'yanovsk, 2014, 148 p. (in Russian).
9. Bukalova A.Yu., Kharitonov V.A. Intellektual'nye instrumental'nye sredstva podderzhki prinyatiya reshenii v zadachakh upravleniya urovнем professional'noi podgotovki studentov [Intelligent decision support tools in the tasks of managing the level of professional training of students]. Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya [Modern problems of science and education]. 2014. № 1. pp. 96–104 (in Russian).
10. Kononov A. E., Yurkin Yu. A. Sredstva podderzhki prinyatiya resheniya dispetcherami upravleniya vozдушным движением [Decision support tools for air traffic controllers]. Civil Aviation High Technologies. 2013. № 198. pp. 34–40 (in Russian).
11. Zuluaga-Gomez J. P., Prasad A., Nigmatulina L., Motlicek P., Kleinert M. A Virtual Simulation-Pilot Agent for Training of Air Traffic Controllers. Aerospace, 2023, Vol. 10, no 5, pp. 490.
12. Ghosh S., Solodovnikov V., Kaul A., Ghosh A. Deep Reinforcement Learning in Service of Air Traffic Controllers. Expert Systems with Applications. 2024, Vol. 238, pp. 121.
13. Bastas D., Vouros G. Deep Reinforcement Learning and Generative Adversarial Imitation Learning for Air Traffic Control Conflict Detection and Resolution. Air Traffic Management and Systems IV. Cham: Springer, 2023. pp. 125-147.
14. Borisov V. E., Borsoev V. A., Bondarenko A. A. Razrabotka perspektivnykh trenazherov, imeyushchikh golosovuyu podderzhku, s funktsiei avtomatizatsii otsenki navykov dispetcherov po upravleniyu vozдушным движением [Development of advanced voice-enabled simulators with the function of automating the assessment of air traffic controllers' skills]. Civil Aviation High Technologies. 2020. Vol. 23, no 6, pp. 8-19 (in Russian).

*Статья поступила в редакцию  
01.09.2025*

# АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ КИНЕМАТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

## ANALYSIS OF THE ACCURACY OF DISTANCE DETERMINATION BY THE KINEMATIC METHOD

**Ковалевич Владислав Валерьевич** – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории авиационного факультета учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь», Республика Беларусь  
vlad.kovalevich@gmail.com

**Vladislav Kovalevich** – Junior Researcher at the Research Laboratory of the Aviation Department at the Military Academy of the Republic of Belarus, Republic of Belarus  
vlad.kovalevich@gmail.com

**Боровой Александр Григорьевич** – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории военного факультета учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь  
baravoi\_aliaksandr@mail.ru

**Alexander Borovoy** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher of the Research Laboratory of the Military Faculty of the Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus  
baravoi\_aliaksandr@mail.ru

**Аннотация:** в статье проведен анализ методов и способов определения дальности и скорости цели в дуэльной ситуации с многофункциональным истребителем. В качестве наиболее универсального выбран кинематический метод определения дальности. Произведен аналитический синтез, на основании которого получены аналитические выражения, характеризующие потенциально достижимую точность оценки дальности постановщика активных помех и скорости сближения с ним. Разработана имитационная математическая модель в среде MatLAB, и проведено моделирование процесса определения дальности и скорости сближения постановщика активных помех и многофункционального истребителя в типовых условиях их воздушного боя. Проиллюстрированы зависимости, и получены диапазоны потенциальных значений оценок дальности и скорости сближения и их ошибок от времени, полученные по результатам моделирования при различном среднеквадратичном отклонении первичных измерений, ускорении многофункционального истребителя и ракурсе полета постановщика активных помех. Обоснованы основные требования к параметрам маневрирования истребителя при ведении воздушного боя в условиях применения активных помех и сделаны выводы по их эффективности на основе анализа потенциальных значений точностных характеристик, полученных при помощи математического моделирования.

**Ключевые слова:** кинематический метод определения дальности, потенциальная точность, связанная система координат, постановщик активных помех, многофункциональный истребитель.

**Abstract:** the article analyzes methods and ways of determining the range and speed of a target in a duel situation with a multifunctional fighter, and selects the kinematic method of determining range as the most universal. An analytical synthesis is performed, based on which analytical expressions are obtained that characterize the potentially achievable accuracy of estimating the range of the active jamming device and the speed of approach to it. A simulation mathematical model is developed in the MatLAB environment, and the process of determining the range and speed of approach of the active jamming device and the multifunctional fighter is simulated under typical conditions of their air combat. The dependences and ranges of potential values of estimates of the range and speed of approach and their errors from time, obtained by the results of modeling at different root-mean-square deviation of primary measurements, acceleration of a multifunctional fighter and flight angle of the active jamming director, are illustrated. The basic requirements to the parameters of maneuvering of a fighter in air combat in conditions of application of active jamming are substantiated and conclusions on their effectiveness are made on the basis of the analysis of potential values of accuracy characteristics obtained by means of mathematical modeling.

**Keywords:** kinematic method of determining range, potential accuracy, associated coordinate system, active jamming system, and multifunctional fighter aircraft.

### Введение

Современный многофункциональный истребитель (МФИ) оснащен бортовой радиолокационной системой (РЛС) [1], которая является источником информации о воздушной и наземной обстановке.

Ее возможности оказывают существенное влияние на эффективность боевого применения МФИ.

Одновременно с развитием помехоустойчивых алгоритмов функционирования бортовых РЛС [5, с. 30–78] происходит совершенствование средств радиоэлектронной борьбы, интенсивно наращиваются возможности по их радиоэлектронному подавлению [2].

Анализ реализованных алгоритмов функционирования бортовых РЛС [5, с. 130 – 154] показывает, что они недостаточно защищены от существующих в настоящее время помех.

Непосредственное измерение дальности и скорости движения цели по принятому сигналу невозможно, что сильно усложняет выполнение боевой задачи. Одним из возможных путей преодоления данной проблемы является использование пассивного режима работы бортовой РЛС, кроме того, это повышает скрытность функционирования МФИ.

Для определения дальности и скорости цели могут использоваться методы косвенного оценивания, сущность которых заключается в приеме сигнала постановщика активных помех (ПАП) в нескольких разнесенных точках пространства [6].

Одним из основных методов косвенного оценивания является *кинематический метод определения дальности* (КМОД), особенность которого заключается в полете МФИ относительно ПАП с заданным ракурсом, что приводит к изменению угла и возникновению угловой скорости и углового ускорения линии визирования, которое используется для оценки текущей дальности и радиальной скорости ПАП. Решение выражений, представленных в [3, 4, 6], возможно в случае пренебрежения параметрами, которые в соседних измерениях отличаются незначительно, кроме того, точность оценок зависит от взаимного расположения ПАП и МФИ. Следовательно, эти выражения не имеют строгого математического решения, что приводит к существенному увеличению ошибки оценки дальности ПАП на больших расстояниях. Актуальной задачей является обоснование математически строгих аналитических выражений, которые инвариантны к кинематике полета ПАП и МФИ.

**Постановка задачи**

В процессе ведения воздушного боя в условиях сложной помеховой обстановки возможна ситуация, когда каналы измерения дальности и скорости борто-

вой РЛС будут подавлены шумовой маскирующей помехой ПАП [1, 2]. В этом случае работа бортовой РЛС возможна только в пассивном режиме, с возможностью измерения угловых направлений на ПАП в связанной системе координат (ССК). При этом на МФИ имеется возможность точного определения собственной скорости полета. По данной информации необходимо определить дальность ПАП и скорость сближения с ним.

Для решения задачи введем следующие допущения о движении ПАП: равномерный прямолинейный полет осуществляется встречным курсом на постоянной высоте.

В дальнейшем проанализируем точность оценки дальности ПАП и скорости сближения с ним для различного среднеквадратического отклонения (СКО) первичных измерений, ускорения МФИ и отклонения ПАП от встречного курса.

**Аналитическое решение задачи**

Представим на рисунке 1 два случая кинематики ПАП и МФИ. В обоих случаях ПАП движется равномерно прямолинейно, а МФИ меняет динамику: в первом случае он движется равномерно, во втором – равноускоренно.

На данном рисунке местоположение МФИ и ПАП обозначено точками  $p_n$  и  $r_n$  соответственно. Точки  $r_{\text{лн}}$  на рисунке 1, а показывают ложное местоположение ПАП, а на рисунке 1, б – необходимое при равномерном его движении. Из рисунка 1, а видно, что при равномерном движении ПАП и МФИ линия визирования вращается вокруг точки  $O$ , при этом применение алгоритма КМОД в условиях априорной неопределенности истинной дальности ПАП невозможно, так как требуется применение специальных маневров.

При равноускоренном полете МФИ и равномерном движении ПАП (рисунок 1, б) существует множество точек пересечения линий визирования. На любой дальности, кроме истинной, движение ПАП будет с ускорением, что не удовлетворяет допущению о дви-

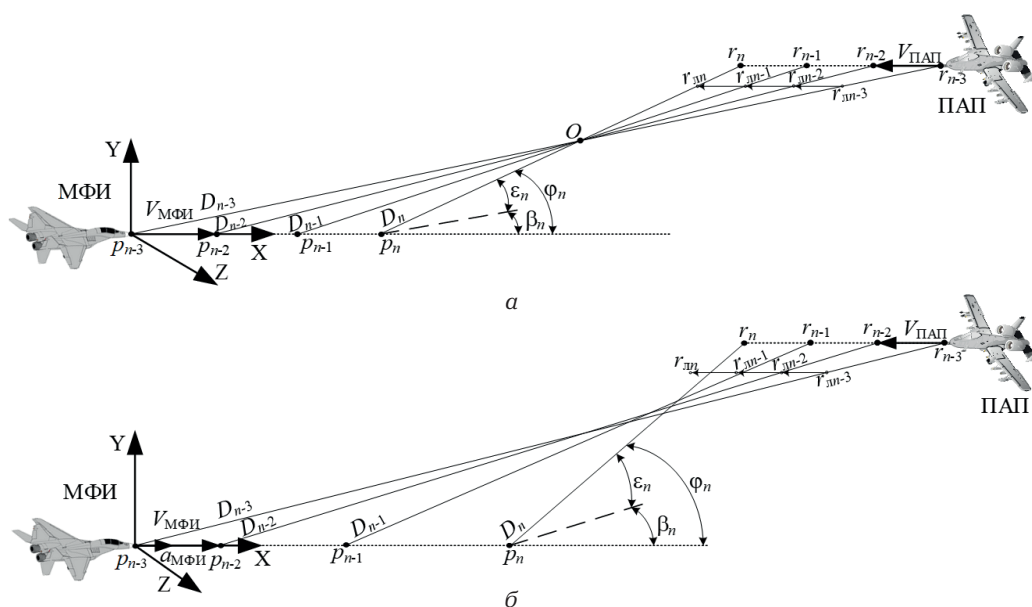


Рисунок 1 – Кинематика движения ПАП и МФИ:  
 а – при равномерном полете МФИ; б – при равноускоренном полете МФИ

жении ПАП. В такой ситуации возможно однозначное получение оптимальных оценок дальности ПАП и скорости сближения с ним.

С учетом того, что МФИ осуществляет полет с постоянным ускорением (рисунок 1, б), запишем систему кинематических уравнений, описывающую процесс взаимного перемещения двух летательных аппаратов:

$$\begin{cases} -\dot{D}_n = (V_{\text{МФИ}} + a_{\text{МФИ}}t_n) \cos \varphi_n + V_{\text{ПАП}} \cos \varphi_n; \\ D_n \dot{\varphi}_n = (V_{\text{МФИ}} + a_{\text{МФИ}}t_n) \sin \varphi_n + V_{\text{ПАП}} \sin \varphi_n, \end{cases} \quad (1)$$

где  $D_n$  — текущая дальность ПАП;

$\dot{D}_n$  — скорость сближения (первая производная дальности по времени);

$V_{\text{МФИ}}$  — скорость МФИ;

$a_{\text{МФИ}}$  — ускорение МФИ;

$V_{\text{ПАП}}$  — скорость ПАП;

$\varphi_n$  — пространственный угол ПАП;

$\dot{\varphi}_n$  — угловая скорость линии визирования;

$t_n$  — дискретное время.

Пространственный угол ПАП может быть найден на основе измеренных с помощью бортовой РЛС азимута  $\beta$  и угла места  $\varepsilon$ :

$$\varphi_n = \arccos(\cos \beta_n \cos \varepsilon_n). \quad (2)$$

Для оценки дальности ПАП и скорости сближения с ним требуются значения угловой скорости и углового ускорения линии визирования, а также текущей скорости МФИ [6]. Наличие двух значений угла  $\varphi$  позволяет рассчитать угловую скорость линии визирования, а трех — ускорение:

$$\dot{\varphi}_n = \frac{\varphi_n - \varphi_{n-1}}{\Delta t}, \quad \ddot{\varphi}_n = \frac{\dot{\varphi}_n - \dot{\varphi}_{n-1}}{\Delta t}, \quad (3)$$

где  $\ddot{\varphi}_n$  — угловое ускорение линии визирования в момент времени  $t_n$ ;

$\Delta t$  — шаг по времени.

При этом на практике скорость ПАП неизвестна, следовательно, система (1) не может быть решена на борту МФИ. Сократим неизвестную величину, для этого продифференцируем второе уравнение системы (1):

$$\begin{aligned} \dot{D}_n \dot{\varphi}_n + D_n \ddot{\varphi}_n &= a_{\text{МФИ}} \sin \varphi_n + \\ &+ (V_{\text{МФИ}} + a_{\text{МФИ}}t_n) \cos \varphi_n \cdot \dot{\varphi}_n + \\ &+ V_{\text{ПАП}} \cos \varphi_n \cdot \dot{\varphi}_n. \end{aligned} \quad (4)$$

Выражение (4) представляет собой дифференциальное уравнение в символической форме. Преобразуем данное выражение:

$$\dot{D}_n \dot{\varphi}_n + D_n \ddot{\varphi}_n = a_{\text{МФИ}} \sin \varphi_n + \dot{\varphi}_n ((V_{\text{МФИ}} + a_{\text{МФИ}}t_n) \cos \varphi_n + V_{\text{ПАП}} \cos \varphi_n), \quad (5)$$

$$\dot{D}_n \dot{\varphi}_n + D_n \ddot{\varphi}_n = a_{\text{МФИ}} \sin \varphi_n - \dot{D}_n \dot{\varphi}_n. \quad (6)$$

Тогда

$$2\dot{D}_n \dot{\varphi}_n + D_n \ddot{\varphi}_n - a_{\text{МФИ}} \sin \varphi_n = 0. \quad (7)$$

Скорость сближения  $\dot{D}_n$  может быть получена из выражения (7):

$$\dot{D}_n = -\frac{\ddot{\varphi}_n}{2\dot{\varphi}_n} D_n + \frac{\sin \varphi_n}{2\dot{\varphi}_n} a_{\text{МФИ}}. \quad (8)$$

Выражение (8) представляет собой дифференциальное уравнение в форме Коши. Решается это уравнение численно с заданными начальными условиями. В реальной ситуации истинная дальность ПАП неизвестна, но для оценки потенциально достижимой точности КМОД зададим начальные условия так, чтобы они были равны истинным значениям дальности.

Конечное выражение оценки текущей дальности ПАП определяется как сумма оценки дальности на предыдущем шаге и ее приращение за интервал времени  $\Delta t$ :

$$D_{n+1} = D_n + \dot{D}_n \cdot \Delta t. \quad (9)$$

### Условия моделирования

Полет МФИ осуществляется с ускорением  $1g$  и начальной скоростью  $200$  м/с, на постоянной высоте  $5$  км, с нулевым ракурсом. Измерение углов визирования ПАП происходит с ошибками. Статистические характеристики ошибок измерений известны: нормальный закон распределения; нулевое математическое ожидание; СКО меняется дискретно и принимает значения  $10,8''$ ,  $3,6''$ ,  $1,08''$  (что соответствует отношению помеха/шум  $60$ ,  $70$  и  $80$  дБ при ширине главного лепестка  $\theta_{\varepsilon 0,5} = \theta_{\beta 0,5} = 3^\circ$ ). ПАП движется равномерно прямолинейно со скоростью  $300$  м/с на высоте  $10$  км встречным курсом.

### Результаты моделирования

Оценки скорости сближения, полученные с помощью выражения (8) для различного СКО первичных измерений, а также истинная скорость сближения

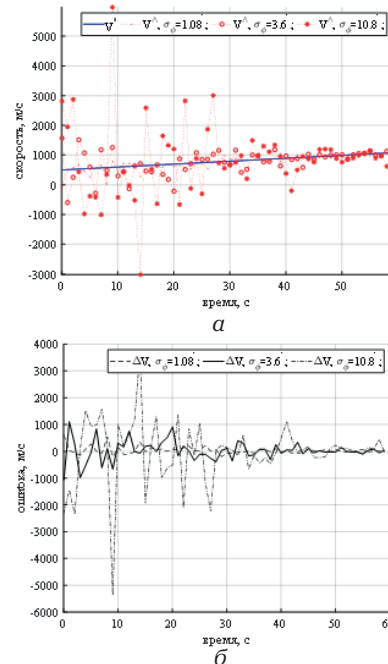


Рисунок 2 — Зависимость изменения оценки скорости сближения ПАП и МФИ от времени:  $a$  — истинное значение и оценка скорости;  $b$  — ошибка оценки скорости

представлены на рисунке 4, а, ошибки оценки скорости сближения — на рисунке 4, б.

Из рисунка 2, а видно, что оценки скорости сближения имеют размах 4000 м/с, убывающий за время полета, и принимают значение, близкое к истинному только на 45 с. Истинная скорость сближения имеет начальное значение 500 м/с и возрастает линейно с крутизной определяемой ускорением МФИ.

Анализ зависимостей, проиллюстрированных на рисунке 2, б, показывает, что для данных условий ошибки оценки скорости сближения могут достигать 5000 м/с на начальном этапе полета и порядка 100 м/с на конечном.

Полученная с помощью выражения (9) зависимость дальности ПАП от времени полета для различных СКО первичных измерений, а также истинное значение

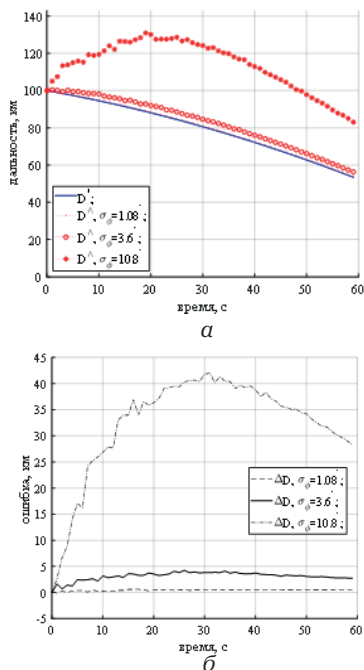


Рисунок 3 — Зависимость изменения дальности ПАП от времени полета:

- а — истинное значение и оценка дальности;
- б — ошибка оценки дальности

дальности представлены на рисунке 3, а, ошибка оценки дальности — на рисунке 3, б.

Анализ зависимостей, представленных на рисунке 3, а, показывает, что оценка скорости сближения несущественно влияет на оценку дальности ПАП. Однако существует ошибка оценки дальности для всех СКО первичных измерений (рисунок 5, б).

Графики, представленные на рисунке 3, б, характеризуются тем, что в начальный момент времени значение ошибки оценки дальности равно нулю, далее оно возрастает и по мере приближения к ПАП ошибка стремится к нулю. При этом на малых дальностях полета ее величина также отлична от нуля. Из графиков видно, что наилучшая ситуация складывается, когда СКО первичных измерений равно 1,08". В этом случае ошибка оценки на протяжении всего полета является минимальной и составляет 1,5 км. Наихудший вариант — когда  $\sigma_\phi = 10,8''$ , тогда ошибка может достигать 40 км.

Из выражения (8) видно, что оценка скорости сближения и, соответственно, дальности ПАП зависит

от ускорения МФИ. Рассмотрим влияние ускорения МФИ, которое изменяется дискретно, принимая значения 1g, 2g и 3g. Результаты оценки дальности ПАП и скорости сближения при различном ускорении МФИ, а также ошибки оценки данных величин представлены на рисунке 4.

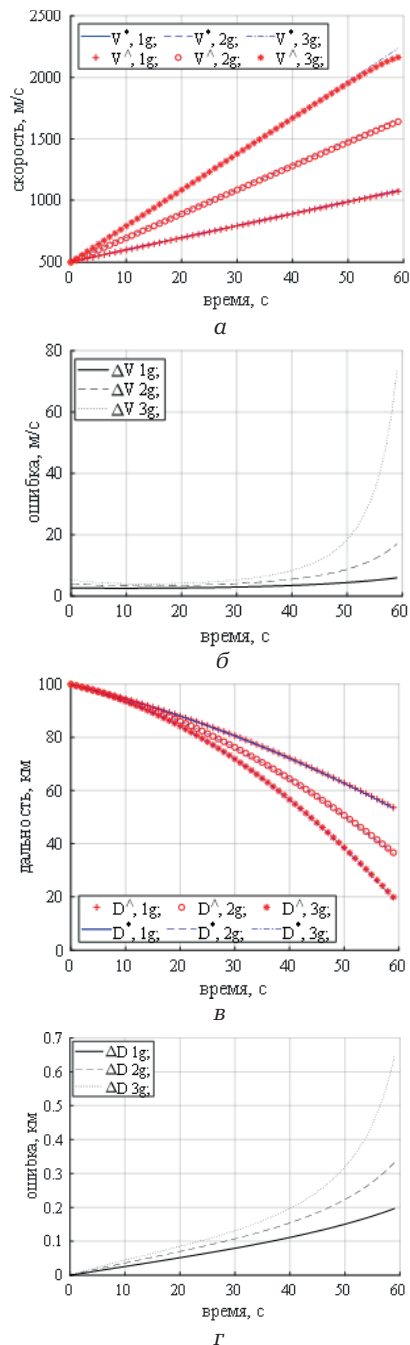


Рисунок 4 — Результат оценки при различном ускорении МФИ:

- а — истинное значение и оценка скорости;
- б — ошибки оценки скорости сближения;
- в — истинное значение и оценка дальности;
- г — ошибки оценки дальности ПАП

Из рисунка 4, а видно, что начальное значение одинаковое, а крутизна скорости сближения зависит от ускорения МФИ.

Анализ зависимостей, представленных на рисунке 4, б показывает, что ошибки оценки скорости

сближения на большой дальности малы и не зависят от ускорения МФИ. По мере сближения МФИ и ПАП ошибка оценки скорости сближения увеличивается.

Анализ графиков на рисунке 4, в показывает, что с увеличением перегрузки при полете оценки дальности ПАП практически равны истинному значению. При этом из рисунка 4, г видно, что при малых перегрузках полета величина ошибки также отличается от нуля.

Рассмотрим дополнительные ошибки, вносимые при отклонении ПАП от встречного ракурса. Зададим изменение ракурсов полета ПАП дискретно в диапазоне 180...160° с шагом 5°, ракурсы с отрицательными значениями не рассматриваем в связи с тем, что характеристики симметричны. Примем, что измерение первичных параметров происходит без ошибок, для того чтобы оценить влияние только ракурса полета ПАП.

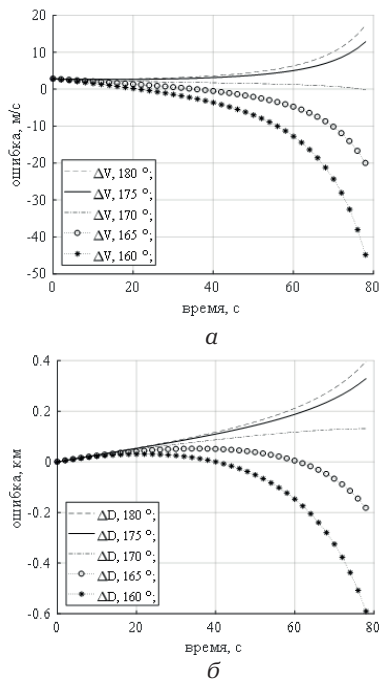


Рисунок 5 — Ошибки оценки при различных ракурсах полета ПАП:  
а — по скорости сближения; б — по дальности

Ошибки оценки дальности и скорости сближения представлены на рисунке 5.

Графики ошибки оценки скорости сближения МФИ и ПАП, представленные на рисунке 5, а, характеризуются начальной ошибкой 2 м/с. Для ракурса полета ПАП, равного 175°, ошибка монотонно убывает к нулю; для остальных ракурсов ошибка возрастает и максимальна в конце полета.

Зависимости ошибок оценки дальности от времени полета, представленные на рисунке 5, б, имеют нулевое начальное значение. Это объясняется идеальными начальными условиями, выбранными при моделировании. По мере полета ошибки увеличиваются в связи с ошибками по скорости.

Результаты моделирования показывают, что оценки дальности и скорости сближения, получаемые с применением КМОД, обладают низкой точностью, которая существенно зависит от СКО измерений углов визирования. Ошибки определения дальности при СКО равном 10,8", могут составлять до 50 % от его истинного значения. При этом обязательным условием является выполнение достаточно длительного полета, порядка 45 с, что обеспечивает схождение оценок скорости сближения к истинному значению.

Использование МФИ бортовой РЛС в пассивном режиме для получения информации о дальности ПАП и скорости сближения для последующего пуска по нему ракет является необходимым тактическим приемом при ведении воздушного боя, а точность оценок влияет на эффективность боевого применения МФИ.

## Заключение

Таким образом, по результатам моделирования можно сделать следующие выводы:

- ошибки, формируемые в бортовых РЛС, существенно зависят от СКО первичных измерений азимута и угла места ПАП, и могут составлять от 1 % до 50 % от истинной дальности (см. рисунок 5, б);

- для повышения точности оценивания дальности и радиальной скорости ПАП необходимо, чтобы МФИ осуществлял движение относительно линии полета ПАП с ракурсом, близким к нулевому (см. рисунок 5), в течение длительного времени, не менее 45 с (см. рисунок 2, а).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Основы теории радиоэлектронной борьбы / под ред. Н. Ф. Николенко. – М.: Воениздат, 1987. – 351 с.
2. Цветков, В. В. Радиоэлектронная борьба: радиоразведка и радиоподавление / В. В. Цветков, В. П. Демин, А. И. Куприянов. – М.: изд-во МАИ, 1998. – 248 с.
3. Южаков, В. В. Современные методы определения местоположения источников электромагнитного излучения / В. В. Южаков // Зарубежная радиоэлектроника. – 1987. – № 8. – С. 67–79.
4. Соколова, Н. С. Возможности наблюдения за маневрами цели с помощью измерения только пеленга или только скорости изменения пеленга / Н. С. Соколова // Новости зарубежной науки и техники. Сер. Авиационные системы, Гос. НИИ авиационных систем. – 1993. – № 4. – С. 5–15.
5. Светлов, А. Ю. Помехоустойчивость алгоритмов обнаружения движущихся целей на фоне помех в импульсных РЛС: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.14 / А. Ю. Светлов. – Челябинск, 2006. – 173 с.
6. Определение координат и параметров движения источников радиоизлучения по угломерным данным в однопозиционных бортовых радиолокационных системах / В. В. Дрогалин [и др.] // Зарубежная радиоэлектроника. – 2002. – № 3. – С. 64–85.
7. Обоснование технического облика аппаратуры прикрытия объектов вооружения и военной техники от бортовых радиолокационных станций обзора земной поверхности многофункциональных самолетов (шифр «Эскаорт») отчет о НИР / ВАРБ; рук. О. Г. Лапука; исполн.: В. А. Малкин [и др.] – Минск, 2016. – 165 с. – № 2081/16.
8. Горгонов, Г. И. Автоматическое сопровождение целей в бортовой радиолокационной станции с ЭВМ / Г. И. Горгонов. – Воронеж, Военно-воздушная инженерная академия, 1988. – 98 с.

## REFERENCES

1. Nikolenko N.F. (Ed). *Osnovy teorii radioelektronnoy bor'by* [Fundamentals of the Theory of Electronic Warfare]. Moscow, Voenizdat, 1987, 351 p. (in Russian).
2. Tsvetkov V.V., Demin V.P., Kupriyanov A.I. *Radioelektronnaya bor'ba: radiotekhnika i radiopodavlenie* [Electronic Warfare: Radio Intelligence and Radio Jamming]. Moscow, MAI Publishing House, 1998, 248 p. (in Russian).
3. Yuzhakov V.V. *Sovremennyye metody opredeleniya mestopolozheniya istochnikov elektromagnitnogo izlucheniya* [Modern Methods for Determining the Location of Electromagnetic Radiation Sources]. *Zarubezhnaya radioelektronika*, 1987, no. 8, pp. 67-79 (in Russian).
4. Sokolova N.S. *Vozможности nablyudeniya za manevrami tseli s pomoshch'yu izmereniya tol'ko pelenга ili tol'ko skorosti izmeneniya pelenга* [Possibilities of Observing Target Maneuvers by Measuring Only Bearing or Only the Rate of Change of Bearing]. *Novosti zarubezhnoy nauki i tekhniki. Ser. Aviatsonnyye sistemy, Gos. NII aviatsonnykh sistem*, 1993, no. 4, pp. 5-15 (in Russian).
5. Svetlov A.Yu. *Pomekhoustoychivost' algoritmov obnaruzheniya dvizhushchikhsya tseli na fone pomekh v impul'snykh RLS*. [Noise Immunity of Algorithms for Detecting Moving Targets Against the Background of Interference in Pulse Radars]. Abstract of Ph. D. Thesis. Chelyabinsk, 2006, 173 p. (in Russian).

6. Drogalin V.V. et al. Opredelenie koordinat i parametrov dvizheniya istochnikov radioizlucheniya po uglomernym dannym v odnopozitsionnykh bortovykh radiolokatsionnykh sistemakh [Determination of Coordinates and Motion Parameters of Radio Emission Sources from Angular Data in Single-Position Airborne Radar Systems]. Zarubezhnaya radioelektronika, 2002, no. 3, pp. 64–85 (in Russian).
7. Lapuka O.G. (Ed.), Malkin V.A. et al. Obosnovanie tekhnicheskogo oblika apparatury prikrytiya ob'ektov vooruzheniya i voennoi tekhniki ot bortovykh radiolokatsionnykh stantsii obzora zemnoi poverkhnosti mnogofunktsional'nykh samoletov (shifr "Eskort"). Otchet o NIR [Justification of the Technical Appearance of Equipment for Covering Objects of Armament and Military Equipment from Airborne Radar Stations for Surveying the Earth's Surface of Multifunctional Aircraft (code "Escort"). Research Report]. Minsk, VARB, 2016, 165 p. no. 2081/16. (in Russian).
8. Gorgonov G.I. Avtomaticheskoe soprovozhdenie tselei v bortovoi radiolokatsionnoi stantsii s EVM [Automatic Target Tracking in an Airborne Radar Station with a Computer]. Voronezh, Military Aviation Engineering Academy, 1988, 98 p. (in Russian).

*Статья поступила в редакцию*  
13.10.2025



# ЮРИДИЧЕСКИЕ НАУКИ

# БЕЗОПАСНОСТЬ ПОЛЕТОВ В МЕЖДУНАРОДНОМ ВОЗДУШНОМ ПРАВЕ

## FLIGHT SAFETY IN INTERNATIONAL AIR LAW

**Колошич Ольга Геннадьевна** – соискатель Национального центра законодательства и правовой информации Республики Беларусь, Республика Беларусь  
olga\_k111@list.ru

**Olga Koloshich** – Applicant of the National Center of Legislation and Legal Information, Republic of Belarus  
olga\_k111@list.ru

**Аннотация:** настоящая статья посвящена раскрытию содержания безопасности полетов в международном воздушном праве. Проведен анализ научной доктрины о месте безопасности полетов, соотношении понятий безопасности полетов (*safety*) и авиационной безопасности (*security*), принципах обеспечения безопасности полетов. Сделан вывод о том, что безопасность полетов является межотраслевым комплексным институтом, входящим в состав института международных полетов и международного аэронавигационного права, включающим в себя безопасность полетов (*safety*) и авиационную безопасность (*security*). Понятия безопасности полетов (*safety*) и авиационной безопасности (*security*) имеют разное правовое регулирование и нормативное содержание. В узком смысле безопасность полетов рассматривается как совокупность технических и эксплуатационных норм для безопасного выполнения международной воздушной перевозки. Авиационная безопасность (*security*) представляет собой акты незаконного вмешательства в деятельность гражданской авиации (захват, угон, совершение террористических актов в отношении воздушных судов). С принятием Приложения 19 к Чикагской конвенции был сформирован новый подход к обеспечению безопасности полетов и создана Единая система управления безопасностью полетов, которая изменила правовое содержание безопасности полетов (*safety*). Единая система управления безопасностью полетов состоит из двух взаимосвязанных систем. Одна система управления безопасностью полетов создается на государственном уровне в виде принятия Государственной программы по безопасности полетов, а вторая система управления безопасностью полетов создается поставщиками обслуживания по направлениям авиационной деятельности.

**Ключевые слова:** безопасность полетов, авиационная безопасность, международное воздушное право, Приложение 19 к Чикагской конвенции.

**Abstract:** this article is devoted to the disclosure of the content of flight safety in international air law. An analysis of the scientific doctrine on the place of flight safety, the relationship between the concepts of safety and aviation security, and the principle of ensuring flight safety is carried out. It is concluded that flight safety is an inter-branch complex institution, which is part of the institution of international flights and international air navigation law, including safety and aviation security. The concepts of flight safety and aviation security have different legal regulation and regulatory content. In a narrow sense, flight safety is considered as a set of technical and operational standards for the safe performance of international air transportation. Aviation security is an act of illegal interference in the activities of civil aviation (capture, hijacking, terrorist acts against aircraft). The concepts of safety and aviation security have different legal regulation and normative content. With the adoption of Annex 19 to the Chicago Convention, a new approach to ensuring safety was formed and a Unified Flight Safety Management System was created, which changed the legal content of safety. The unified flight safety management system consists of two interconnected systems. One flight safety management system is created at the state level in the form of adoption of the State Flight Safety Program and the second flight safety management system is created by service providers in the areas of aviation activity.

**Keywords:** flight safety, aviation security, international air law, Annex 19 to the Chicago Convention.

### Введение

Обеспечение безопасности полетов является основополагающим принципом международного воздушного права как отрасли международного права.

В целом обеспечение безопасности международной гражданской авиации является целью международной воздушной перевозки. Для определения содержания безопасности полетов международной гражданской авиации необходимо провести анализ стандартов и рекомендуемой практики приложений к Чикагской конвенции, анализ научных подходов в данной области, разграничить понятия безопас-

ности полетов, авиационной безопасности и актов незаконного вмешательства в деятельность гражданской авиации, соотнести ответственность за нарушения требований по безопасности полетов и авиационной безопасности.

### Основная часть

Советские ученые широко рассматривали подходы к обеспечению безопасности полетов (В. Д. Бордунов, М. М. Волков, В. Н. Дежкин, А. И. Котов, Ю. Н. Колосов, М. Н. Копыла, Ю. Н. Малеев, А. П. Мовчан, В. Н. Мусатов и другие).

В. Д. Бордунов, А. И. Котов и Ю. Н. Малеев в рамках института международных полетов выделяли принцип обеспечения безопасности полетов (обеспечение безопасности пассажиров, грузов, аэропортов) как принцип международной гражданской авиации в целом [1, с. 28–29], выделяя в «техническом» значении термин «безопасность» (safety), а обеспечение «социальной» безопасности гражданской авиации (security) – как систему норм международного воздушного права, обеспечивающих безопасность гражданской авиации от актов угона самолета, шантажа, диверсии на воздушном транспорте, объединенных собирательным понятием «акты незаконного вмешательства в деятельность гражданской авиации» [1, с. 58–59].

Основной гипотезой исследования в данной статье является мнение В. Д. Бордунова, А. И. Котова и Ю. Н. Малеева о том, что «при разделении мер по обеспечению и раздельном значении понятий «safety» и «security» происходило не только становление и развитие соответствующих двух групп норм в международном воздушном праве, которые в конечном итоге объединились в рамках принципа «обеспечения безопасности», но и терминологическая дифференциация этих двух групп по английским терминам «safety» и «security», которые одинаково переводятся на русский язык как «безопасность», хотя и имеют различное значение» [1, с. 61].

А. Я. Капустин, выделяя принцип обеспечения безопасности международной гражданской авиации, рассматривал его как суверенное право государства принимать меры технического, эксплуатационного, организационного, аэронавигационного и информационного характера, обеспечивающие выполнение международных и внутренних полетов без угрозы для жизни и здоровья людей [2, с. 209]. Также, говоря о двусторонних соглашениях о воздушном сообщении, в которых имеются обязательства по поддержанию должного уровня безопасности, следует отметить наличие процедур по вопросам, связанным с актами или угрозами незаконного вмешательства против безопасности гражданской авиации [2, с. 210].

В учебнике «Советское воздушное право» безопасность полетов понималась как требования к обеспечению безопасности движения воздушных судов в установленном порядке выполнения полетов с учетом направления, ширины, высоты элементов структуры воздушного пространства (воздушных трасс, местных воздушных линий, установленных маршрутов) [3, с. 83–84].

Принцип безопасности полетов как основной принцип международного аэронавигационного права выделял В. Н. Дежкин. Основным предназначением института управления воздушным движением в международных воздушных сообщениях, по его мнению, является правовое обеспечение безопасности воздушного движения. Применительно к субъекту воздушной перевозки безопасность полетов рассматривается как обязательство авиаперевозчика в части обеспечения безопасности международных перевозок [4, с. 16, 26, 31].

А. И. Травников и А. Х. Абашидзе указывали на принцип обеспечения безопасности международной аэронавигации и деятельности в гражданской авиации, который является основополагающим для международных договоров в области международного

воздушного права, на основании чего формируется национальное воздушное законодательство государств в двух основных областях: в обеспечении технической безопасности авиационной деятельности и аэронавигации (safety) и в области обеспечения авиационной безопасности (security) [5, с. 17–18].

Безопасность полетов как обеспечение безопасности использования воздушного пространства рассматривал профессор В. Н. Гречуха [6]. Профессор Н. С. Бойко разделяет позицию, что безопасность полетов важна при государственном регулировании использования воздушного пространства [7, с. 64].

Таким образом, в юридической науке к настоящему времени сформировались два подхода о месте и содержании принципа обеспечения безопасности полетов, а именно в рамках института международных полетов и международных воздушных сообщений и в рамках международного аэронавигационного права.

Отдельно можно выделить исследования обеспечения безопасности полетов воздушных судов над открытым морем. Так, М. Н. Копылов говорит о необходимости «обеспечения безопасности полетов в воздушном пространстве над открытым морем и необходимости дополнения Чикагской конвенции принципом безопасности воздушного движения над открытым морем и оказания помощи воздушным судам, терпящим бедствие» [8, с. 9, 20]. Это свидетельствует о системной межотраслевой характеристике принципа безопасности полетов.

На основании исторического анализа института обеспечения безопасности полетов в рамках советского воздушного права, в том числе Воздушных кодексов (далее – ВК) СССР 1932, 1935, 1961, 1983 гг., белорусский исследователь И. В. Гринев указывает, что требования по безопасности полетов содержались в ВК СССР 1932 г. в части обязательного наличия свидетельства о годности воздушного судна, специальной подготовки экипажа, обязанности командира по безопасности полета и издания обязательных правил. В ВК СССР 1961 г. было расширено нормативное регулирование безопасности полетов, которое в ВК СССР 1983 г. осталось без изменений. Как подчеркивает И. В. Гринев, требуются дополнительные научные исследования определения сущности и содержания правового института обеспечения безопасности полетов и ограничения его от смежных институтов воздушного права [9].

Полагаем обоснованным рассмотрение принципа обеспечения безопасности полетов в контексте деятельности Международной организации гражданской авиации (далее – ИКАО) и выполнения ею функций, содержащихся в статье 44 Конвенции о международной гражданской авиации (далее – Чикагская конвенция).

Основания деятельности ИКАО в области безопасности международных полетов вытекают из положений Чикагской конвенции и требований ИКАО. Китайский исследователь Лю Синь в диссертационном исследовании международной правовой системы регулирования международных полетов гражданских воздушных судов отмечает, что обеспечение безопасности полетов строится на внедрении системы управления ИКАО. Как полагает Лю Синь, существуют три отдельные, но взаимосвязанные категории, к которым можно отнести все виды деятельности ИКАО: разработка стандартов для определения

требований, регулирующих деятельность международной гражданской авиации; внедрение и осуществление корректирующих действий для обеспечения эффективного выполнения требований ИКАО и осуществления программ по безопасности полетов с учетом глобальных, региональных и субрегиональных аспектов; мониторинг обеспечения соответствия требованиям в области безопасности полетов, оценка эффективности соответствия требованиям в области безопасности полетов и оценка эффективности существующих программ в области безопасности полетов (анализ) [10].

Разделяя позицию китайского ученого, подчеркнем, что развитие специального, детального регулирования в рамках ИКАО свидетельствует не только о возрастающей важности вопросов безопасности полетов, но и о расширении предмета регулирования, включении в сферу безопасности ряда смешанных категорий, таких как подготовка авиационного персонала, летная годность воздушных судов и другие элементы, которые ранее были урегулированы исключительно как отдельные вопросы в рамках некоторых стандартов Приложений к Чикагской конвенции.

В настоящее время ИКАО приняла Стратегический план на 2026–2050 годы «Безопасное небо. Устойчивое будущее». Первая цель плана – «Каждый полет безопасен и надежен» (англ. *Every flight is safe and secure*) [11]. Для ее реализации необходимо обеспечить защиту пассажиров и грузов от рисков, связанных с безопасностью полетов, угроз авиационной безопасности, вызванных актами незаконного вмешательства в деятельность гражданской авиации, добиться нулевого количества смертельных случаев в результате авиационных происшествий и инцидентов, создать безопасную, надежную и устойчивую систему гражданской авиации.

Нормативное регулирование требований к обеспечению безопасности полетов на уровне правового акта содержится в Приложении 19 «Управление безопасностью полетов» к Чикагской конвенции (далее – Приложение 19) [12]. Как указано в исторической справке к Приложению 19, подход по принятию отдельного приложения начался после рекомендаций Конференции генеральных директоров гражданской авиации по глобальной стратегии в сфере безопасности полетов (Монреаль, 20–22 марта 2006 года) (DGCA/06) [13] и Конференции высокого уровня по безопасности полетов (Монреаль, 29 марта – 1 апреля 2010 года) (HLSC/2010) [14]. В основу его создания вошли положения стандартов и рекомендуемой практики управления безопасностью полетов, содержащиеся в Приложении 1 «Выдача свидетельств авиационному персоналу», Приложении 6 «Эксплуатация воздушных судов», Приложении 8 «Летная годность воздушных судов», Приложении 11 «Обслуживание воздушного движения», Приложении 13 «Расследование авиационных происшествий и инцидентов», Приложении 14 «Аэродромы» к Чикагской конвенции.

В 2013 году было издано Приложение 19, в котором впервые был закреплён подход к системе управления безопасностью полетов в международной гражданской авиации. В 2016 году вышло новое издание Приложения 19, которое внесло изменения в части объединения и реорганизации действующих стандартов и рекомендуемой практики. В настоящее время дей-

ствует Приложение 19 в редакции 2019 года. Анализ эволюции введения стандартов, содержащихся в Приложении 19, и их действующий объем свидетельствуют о принципиально обновленном, расширенном подходе к обеспечению безопасности полетов.

Обеспечение безопасности полетов строится на *создании Единой системы управления безопасностью полетов*. Она состоит из *двух взаимосвязанных систем*: системы управления безопасностью полетов, которая создается на государственном уровне каждым государством – членом ИКАО, и системы управления безопасностью полетов, создаваемой поставщиками обслуживания (авиационными организациями), в области подготовки персонала, выполнения полетов, технического обслуживания, разработки и производства воздушных судов, обслуживания воздушного движения, аэродромного обеспечения полетов.

Обязательства государств в рамках реализации подходов в области безопасности полетов выражаются в создании Государственной программы по безопасности полетов (далее – ГосПБП) для достижения приемлемого уровня безопасности полетов, который устанавливается самими государствами.

ГосПБП представляет собой комплекс нормативных документов и мероприятий по повышению уровня безопасности полетов, включающий в себя нормативные документы по безопасности полетов, контроль за обеспечением безопасности полетов, систему обязательной и добровольной отчетности; расследование авиационных происшествий и инцидентов; анализ и обмен данными по безопасности полетов; гарантии безопасности полетов и популяризацию вопросов безопасности полетов.

Государство, выполняя свои обязанности по обеспечению безопасности полетов, осуществляет контроль за обеспечением безопасности полетов (*State Safety Oversight*) и надзор за обеспечением безопасности полетов (*Surveillance obligations*).

Контроль и надзор за обеспечением безопасности полетов являются, на первый взгляд, понятиями с одинаковой правовой сущностью, однако имеют разное значение при формировании Единой системы управления безопасностью полетов.

*Контрольные функции* государства подробно раскрыты в Части А «Создание государственной системы контроля за обеспечением безопасности полетов и управление этой системой» Doc 9734 «Руководство по организации контроля за обеспечением безопасности полетов». Каждое государство создает и вводит государственную систему контроля за обеспечением безопасности полетов, которая включает восемь критических элементов (далее – КЭ). Все КЭ взаимосвязаны и взаимообусловлены. Так, обязательства по надзору входят, в том числе, в состав контроля за обеспечением безопасности полетов.

Для проверки соблюдения стандартов и рекомендуемой практики реализации функции контроля ИКАО разработала и на регулярной основе реализует *Универсальную программу по проведению проверок организации контроля за обеспечением безопасности полетов* (далее – УППКБП) (англ. *Universal Safety Oversight Audit Programme*), предусматривающую проведение во всех Договаривающихся государствах регулярных, обязательных, систематических и согласованных проверок состояния безопасности полетов.

УППКБП оценивает системы контроля за обеспечением безопасности полетов в государствах — членах ИКАО на основе подхода *непрерывного мониторинга*.

Функции надзора содержатся в Дос 8335 «Руководство по процедурам эксплуатационной инспекции, сертификации и постоянного надзора». Государство несет ответственность за обеспечение безопасности полетов в своей стране и устанавливает требования к поставщикам обслуживания (авиационным организациям) создавать систему управления безопасностью полетов (далее — СУБП).

Актуальность и своевременность рассматриваемых вопросов обеспечения безопасности полетов подчеркивает разработанная ИКАО в 2024 году *новая поправка* в Приложение 19.

Поправка в Приложение 19 направлена на совершенствование положений ГосПБП. Особое внимание уделяется действиям государств по выполнению обязательств по надзору за авиационными организациями, которые должны разработать методологию очередности проведения надзорных мероприятий на основе оценки рисков (*RBS — Risk Based Surveillance*) в тех областях, которые представляют повышенный риск. Она должна быть ориентирована на достижение конкретных результатов, а не только на проведение различных инспекций и проверок.

В институте обеспечения безопасности полетов появляется определенный механизм реализации его составной части по надзору, а в принципе обеспечения безопасности полетов дается понимание приоритетности проведения надзорных мероприятий в зависимости от оценки степени риска и по утвержденной методологии. Новыми субъектами, к которым применяются требования по обеспечению безопасности полетов, являются беспилотные воздушные суда, их техническое обслуживание и вертодромы.

Введение подхода о возможности применения СУБП к организациям, которые не являются авиационными организациями, но взаимодействуют с ними в авиационной деятельности, если государство считает нужным для поддержания безопасности полетов в целом в государстве, подчеркивает взаимосвязь управления рисками, имеющимися в авиационной безопасности, упрощение формальностей, экономике, окружающей среде, с рисками, связанными с обеспечением безопасности полетов.

В поправке ИКАО усиливается реализация *проактивного и комплексного подхода к управлению безопасностью полетов*, повышению эффективности обеспечения безопасности полетов, популяризации вопросов безопасности полетов, формированию позитивной культуры обеспечения безопасности полетов.

Таким образом, подходы по обеспечению безопасности полетов в гражданской авиации, содержащиеся в Приложении 19 к Чикагской конвенции, являются общими системными подходами, применяемыми государствами — членами ИКАО в рамках Чикагской конвенции. Анализ содержания и целей действующих стандартов и предлагаемых поправок свидетельствует об их нормативной обязательной природе. Государства обязаны обеспечить их в полном объеме в силу выполнения обязательств по статьям 37 и 38 Чикагской конвенции.

Принцип обеспечения безопасности полетов в контексте современных согласованных требований по Чикагской конвенции рассматривается как совокупность норм, содержащих требования к эксплуатации воздушного судна и выполнению «технических» аспектов безопасной воздушной перевозки, и норм, которые составляют *право авиационной безопасности (security)*.

В белорусской науке такую позицию международного права еще ранее высказала профессор О. Н. Толочко, которая в «безопасность полетов» включила не только «техническое» значение, а именно обеспечение аэронавигационных, технических аспектов международных полетов, ликвидацию последствий авиационных происшествий, но и такой аспект «как борьба с преступными посягательствами на безопасность полетов: угон самолета, диверсии, террористические акты на воздушном транспорте. Данный принцип закреплен в Чикагской конвенции, Токийской конвенции о преступлении на борту воздушного судна 1963 г., Гаагской конвенции о борьбе с незаконным захватом воздушных судов 1970 г., Монреальской конвенции о борьбе с незаконными актами, направленными против безопасности гражданской авиации 1971 г.» [15].

Развивая комплексный подход, обозначим, что обеспечение безопасности полетов не ограничивается техническими требованиями к перевозке, аэронавигационными аспектами и расследованием авиационных происшествий. Современные реалии, отраженные в последней редакции Приложения 19 и связанных с ним документах, диктуют учитывать обязательное соблюдение требований воздушной перевозки к авиационному персоналу, соблюдению правил эксплуатации воздушных судов, обслуживанию воздушного движения, аэродромному обеспечению полетов, проектированию и эксплуатации аэродромов.

Российские ученые безопасность полетов и авиационную безопасность рассматривают как две правовые категории одного принципа безопасности полетов.

А. И. Травников и А. Х. Абашидзе относят обеспечение технической безопасности авиационной деятельности и аэронавигации (*safety*) и область обеспечения социальной авиационной безопасности (*security*) в совокупности к принципу обеспечения безопасности международной аэронавигации. В понятие «*safety*» включали нормы о структуре воздушного пространства и системе эшелонирования; нормы летной годности воздушных судов, технические требования по безопасной эксплуатации аэродромов, правила допуска и подготовки экипажей к управлению воздушным движением; правила полетов и управление воздушным движением, контроль за порядком использования воздушного пространства, а в «*security*» — нормы, направленные на предотвращение актов незаконного вмешательства в деятельность гражданской авиации [5, с. 17–18]. Рассматривая принцип обеспечения безопасности полетов, Ю. М. Колосов и В. И. Кузнецов подчеркивают обязанность государств принимать меры по обеспечению технической надежности авиационной техники, аэропортов, вспомогательных служб и воздушных трасс и вести борьбу с актами незаконного вмешательства в деятельность гражданской авиации [16, с. 9]. В. С. Ве-

решетин говорил, что «обеспечение всесторонней безопасности международной гражданской авиации составляют не только нормы международного воздушного права, но и нормы, обеспечивающие техническую, эксплуатационную надежность и пригодность гражданских воздушных судов, надлежащую квалификацию экипажей, универсальные правила международных полетов, но и появившиеся в последние годы нормы международного воздушного права, направленные на защиту гражданских воздушных судов от нападения, захвата и угона, т. е. от различных посягательств» [17, с. 128].

Таким образом, как белорусские, так и российские ученые в понятие безопасности полета включают соблюдение технических требований для выполнения международного полета и комплекс мер по защите гражданских воздушных судов от захвата, угона и иных действий, которые могут произойти в полете. Данная позиция является верной, если рассматривать безопасность гражданской авиации как комплексную и конечную цель выполнения международной воздушной перевозки. Это является также верным с учетом действующих целей деятельности ИКАО об обеспечении безопасного и упорядоченного развития международной гражданской авиации и безопасности полетов в международной аэронавигации, установленных в статье 44 Чикагской конвенции.

Однако полагаем, что в науке не сформировано точное понимание «технических» норм и требований к эксплуатации воздушного судна. В данной части необходимо продолжить изучение указанной правовой категории и рассмотреть ее с учетом правовых норм, содержащихся в стандартах и рекомендуемой практике Приложений к Чикагской конвенции, относящихся к безопасности полетов.

В Приложении 19 было определено, что «безопасность полетов» — это состояние, при котором риски, связанные с авиационной деятельностью, относящиеся к эксплуатации воздушных судов или непосредственно обеспечивающей такую эксплуатацию, снижены до приемлемого уровня и контролируются.

Можно сделать вывод, что в настоящее время обеспечение безопасности полетов приобретает новое содержание и включает в себя пять взаимосвязанных направлений реализации: подготовка авиационного персонала (*PEL — Personnel Licensing*), производство полетов (*OPS — Operation Safety*), летная годность и поддержание летной годности (*AIR — Airworthiness of aircraft*), аэронавигационное обслуживание воздушного движения (*ANS — Air Navigation Services*), аэропортовое обеспечение (*AGA — Aerodromes and Grand Aids*).

В содержание обеспечения безопасности полетов входят производство полетов и аэронавигационное обеспечение полетов. Как указано выше, производство полетов рассматривается как совокупность норм института международных полетов или международных воздушных сообщений, а аэронавигационное обеспечение полетов рассматривается в институте международного аэронавигационного права.

В производство полетов входят правила полетов и их выполнение, содержащиеся в стандартах и рекомендуемой практике Приложение 2 к Чикагской конвенции [18], и эксплуатация воздушных судов, содержащаяся в Приложении 6 к Чикагской конвенции [19].

Правила полетов устанавливают требование об обязательном выполнении всех указаний полномочного органа по организации воздушного движения, в воздушном пространстве которого выполняется полет, назначенный государством, имеющим юрисдикцию над пролетаемой территорией, требования к соблюдению правил визуальных полетов и правил полетов по приборам, составление планов полетов, содержание сигналов бедствия и скорости, аэродромное движение, регулирование движения воздушных судов на земле, действия экипажей воздушных судов при совершении акта незаконного вмешательства.

Эксплуатация воздушного судна делится на две составляющие: производство полетов воздушным судном и требования к летно-техническим характеристикам воздушных судов.

К требованиям по производству полетов относятся: соблюдение законов, правил, процедур как национальным, так и иностранным перевозчиком; управление безопасностью полетов; непосредственное выполнение эксплуатационных требований в зависимости от вида и типа воздушного судна; сертификационные требования к перевозчику; подготовка к полетам; правила, выполняемые в полете; обязанности командира воздушного судна и других членов экипажа; контроль за утомлением; процесс управления рисками, связанными с FRMS; контроль за обеспечением безопасности полетов.

Эксплуатационные ограничения летно-технических характеристик воздушных судов заключаются в соблюдении требований к воздушному судну при полетах ночью, полетах по приборам, в определенных метеоусловиях, требования к наличию в воздушном судне бортовых приборов, полетной документации, навигационного оборудования, связного оборудования, оборудования наблюдения, а также непосредственно техническое обслуживание и поддержание летной годности воздушного судна.

Таким образом, правила полетов и эксплуатация воздушного судна напрямую связаны с использованием воздушного пространства и обеспечением безопасной технической эксплуатации воздушного судна и безопасности международной аэронавигации. Кроме того, требования к безопасности полетов установлены в разделе 3.3 Главы 3 «Управление безопасностью полетов», Главе 13 «Безопасность», Добавлении 5 «Контроль за обеспечением эксплуатационной безопасности полетов» и в Добавлении F «Система документации по безопасности полетов» Приложения 6 «Эксплуатация воздушных судов» к Чикагской конвенции [19].

Как отмечается в литературе, «аэронавигация» представляет собой комплекс мер по организации воздушного пространства, осуществлению разрешительного и уведомительного порядков, планированию и координации использования воздушного пространства при осуществлении в нем любых видов деятельности, а также по обслуживанию воздушного движения управляемых летательных аппаратов и контролю за порядком использования воздушного пространства» [20, с. 14]. Как мы видим, аэронавигационное обслуживание воздушного движения (*ANS — Air Navigation Services*), входящее в обеспечение безопасности полетов, является элементом аэронавигации и входит в содержание понятия «аэронавигация»

и норм института международного аэронавигационного права.

Более широкое понимание содержания обслуживания воздушного движения содержится в Приложении 11 «Обслуживание воздушного движения» к Чикагской конвенции и включает в себя полетно-информационное обслуживание, аварийное оповещение, консультативное обслуживание воздушного движения, диспетчерское обслуживание воздушного движения (районное диспетчерское обслуживание, диспетчерское обслуживание подхода или аэродромное диспетчерское обслуживание), классификацию воздушного пространства, производство полетов в условиях навигации, основанной на характеристиках PBN (навигация, основанная на характеристиках), полеты с использованием связи и наблюдения, требования к районам полетной информации, диспетчерским районам, диспетчерским зонам, маршрутам организации воздушного движения, координацию действий между эксплуатантом и службами воздушного движения, военным и гражданским сектором, в аварийной ситуации, непредвиденных обстоятельствах, утомлении [21].

Кроме этого, Приложение 11 устанавливает требования к управлению безопасностью полетов в разделе 2.29 Главы 2 и Добавлении 6 «Требования к системе управления факторами риска, связанными с утомлением FRMS» [21].

Таким образом, безопасность полетов в гражданской авиации в широком контексте рассматривается как *комплексный институт*, включающий в себя правила полетов, эксплуатацию воздушного судна, обеспечение аэронавигации. Безопасность полетов широко регламентирована в рамках института международных полетов и в рамках международного аэронавигационного права, является принципом международного воздушного права и комплексным правовым институтом.

В терминологическом понимании понятие безопасности в гражданской авиации часто понимается как авиационная безопасность (*security*). Однако авиационная безопасность (*security*) отличается от понятия безопасности полетов (*safety*) по своему правовому регулированию и нормативному содержанию.

А. И. Травников, А. Х. Абашидзе к авиационной безопасности относят «акты ненадлежащего использования гражданской авиации» и действия государств по пресечению противоправных деяний с использованием гражданских воздушных судов [5, с. 162]. При проведении исследования П. А. Григорян указывает на виды противоправных действий, которые относятся к актам незаконного вмешательства в деятельность гражданской авиации, выделяет и проводит анализ таких видов как незаконный захват воздушного судна, воздушное пиратство, воздушный терроризм. Рассматривает принятые международные правовые акты для борьбы с ними и указывает на действия, которые должны быть приняты. Указанные авторы рассматривают Гагскую конвенцию 1970 г. и Приложение 17 к Чикагской конвенции [22].

Ряд авторов предлагает установить процедуры противодействия таким актам, тем самым раскрывая их правовое значение. Так, М. Л. Хабачилов предлагает разработать процедуры противодействия и применения силы государствами, в том числе оружия и боевой техники в отношении воздушных су-

дов, используемых в противоправных целях [23]. А. С. Конюхова рассматривает международно-правовые основы противодействия по совершению неправомерных мер на воздушном транспорте, к которым относятся деяния, связанные с нарушением правил маневрирования или эксплуатации воздушных судов, акты незаконного вмешательства, акты ненадлежащего использования гражданской авиации, акты недисциплинированного поведения на борту воздушного судна в полете и установление правил юрисдикции государств в отношении таких деяний [24]. Однако, полагаем, выделение автором деяний, связанных с нарушением правил маневрирования или эксплуатации воздушных судов, не относится к авиационной безопасности. Они являются нарушением правил эксплуатации воздушных судов и правил полетов, нарушающих систему управления безопасностью полетов в части производства полетов *OPS (Operation Safety)*, установленную в Приложении 2 и Приложении 6 к Чикагской конвенции.

Правовое содержание авиационной безопасности вытекает из правовых норм Приложения 17 к Чикагской конвенции [25], которое посвящено вопросам защиты гражданской авиации от актов незаконного вмешательства.

Виды деяний, которые классифицируются как акты незаконного вмешательства, содержатся в Конвенции о преступлениях и некоторых других действиях, совершаемых на борту воздушного судна (Токийская конвенция 1963 г.) [26], Конвенции о борьбе с незаконным захватом воздушных судов (Гагская конвенция 1970 г.) [27], Конвенции о борьбе с незаконными актами, направленными против безопасности гражданской авиации (Монреальская конвенция 1971 г.) [28], Конвенции о борьбе с незаконными актами в отношении международной гражданской авиации (Пекинская конвенция 2010 г.) [29].

Проанализировав вышеуказанные источники права международной авиационной безопасности, можно сказать, что выделенные виды актов незаконного вмешательства в деятельность гражданской авиации, являются противоправными. Последствия за совершение противоправных деяний в сфере авиационной безопасности влекут за собой ответственность уголовно-правового характера. Ответственность перевозчика по договору международной воздушной перевозки в части обеспечения безопасности полетов вытекает из варшавской и монреальской систем ответственности, к которым относится Конвенция для унификации некоторых правил, касающихся международных воздушных перевозок, заключенная в Варшаве 12.10.1929 г. (Варшавская конвенция 1929 г.), и протоколы к ней [30], а также Конвенция для унификации некоторых правил международных воздушных перевозок, заключенная в Монреале 28.05.1999 г. (Монреальская конвенция 1999 г.) [31].

Таким образом, безопасность полетов в гражданской авиации в широком контексте рассматривается как *межотраслевой комплексный институт*, включающий в себя безопасность полетов (*safety*) и авиационную безопасность как защиту гражданской авиации от актов незаконного вмешательства в деятельность гражданской авиации (*security*), так и в узком контексте как совокупность технических

и эксплуатационных норм для безопасного выполнения международной воздушной перевозки.

Авиационная безопасность регулирует общественные отношения, вытекающие из актов незаконного вмешательства в деятельность гражданской авиации и противодействия их совершения, таких как захват, угон гражданских воздушных судов и другие террористические акты.

Авиационная безопасность регулирует неправомерное поведение, противоправные действия отдельных физических лиц, нарушающие установленный порядок функционирования гражданской авиации, а безопасность полетов регулирует правомерное поведение. Однако безопасность полетов и авиационная безопасность не исключают друг друга, а дополняют в достижении единой цели – выполнение безопасной воздушной перевозки.

Безопасность полетов и авиационная безопасность имеют специальное правовое регулирование, свой предмет и цели регулирования и являются двумя самостоятельными структурными элементами в системе международного воздушного права. Они регламентированы различными нормами в системе универсального регулирования (в рамках Чикагской конвенции), и характер ответственности за их нарушение различен.

Важно, что содержание правоотношений в рамках безопасности полетов и авиационной безопасности различно. Оба института носят смешанный характер комплексного регулирования совместно с иными подсистемами в международном праве. Право авиационной безопасности сопряжено с правом международной безопасности, в то время как институт обеспечения безопасности полетов характеризуется комплексностью взаимодействия норм международного воздушного права и международного экономического права.

С учетом изложенного, можно сделать следующие выводы:

1. Принцип обеспечения безопасности полетов является принципом международного воздушного права, вытекающим из Чикагской конвенции. Принцип обеспечения безопасности полетов приобрел новое правовое содержание с принятием стандартов и рекомендуемой практики Приложения 19 к Чикагской конвенции, был систематизирован, наполнен комплексным содержанием, расширен требованиями к подготовке персонала, поддержанию летной годности, аэродромному обеспечению полетов.

2. Понятие безопасности полетов отличается от авиационной безопасности, имеет разное правовое регулирование и нормативное содержание. Безопасность полетов в широком смысле понимается как достижение выполнения международной воздушной перевозки в целом безопасно, то есть без нарушения требований обеспечения безопасности полетов и авиационной безопасности. Безопасность полетов в узком смысле означает реализацию установленной системы управления безопасностью полетов, включающей в себя совокупность технических и эксплуатационных норм для безопасного выполнения международной воздушной перевозки.

3. Широкий подход к содержанию безопасности полетов позволяет уточнить место совокупности принципов и норм, регулирующих безопасность полетов, определив их как комплексный межотраслевой институт, сопряженный с непосредственно обеспечением полетов, аэронавигационной безопасностью, в т. ч. безопасностью воздушного судна и аэропорта, должной подготовкой персонала, международными воздушными перевозками и др.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бордунов, В. Д. Правовое регулирование международных полетов гражданских воздушных судов / В. Д. Бордунов. – М.: Наука, 1988. – 209 с.
2. Международное право: в 2 т.: учебник для вузов / А. Я. Капустин [и др.]. – Москва: Издательство Юрайт, 2022. – Т. 2. Особенная часть. – 443 с.
3. Волков, М. М. Советское воздушное право: учебное пособие / М. М. Волков, В. Н. Дежкин, В. Н. Мусатов. – Л.: ОЛАГА, 1984. – 280 с.
4. Дежкин, В. Н. Правовое регулирование международной аэронавигации: автореф. дис. ... канд. юрид. наук. – Л., 1988. – 42 с.
5. Международное воздушное право: учебник для вузов / А. И. Травников [и др.]; под редакцией А. И. Травникова, А. Х. Абшидзе. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2024. – 474 с.
6. Гречуха, В. Н. Транспортное право: правовое регулирование деятельности воздушного транспорта: монография // КонсультантПлюс. Россия: справ. правовая система (дата обращения: 01.01.2025).
7. Бойко, Н. С. Воздушное право: учебное пособие для вузов / Н. С. Бойко. – М.: Юрайт, 2021. – 217 с.
8. Копылов, М. Н. Международно-правовое регулирование полетов воздушных судов над открытым морем / М. Н. Копылов. – М., 1980. – 25 с.
9. Гринев, И. В. История становления института обеспечения безопасности полетов в контексте формирования советского воздушного права / И. В. Гринев // Авиационный вестник. – 2024. – № 10. – С. 54–58.
10. Лю, С. Формирование и развитие международно-правовой системы регулирования международных полетов гражданских воздушных судов: автореф. дис. ... канд. юрид. наук: 12.00.10 / С. Лю. – М., 2010. – 22 с.
11. Стратегический план ICAO на 2026–2050 «Безопасное небо. Устойчивое будущее». – URL: <https://www.icao.int/secretariat/SecretaryGeneral/Documents/ICAO%20Strategic%20Plan%202026-50-04.pdf>.
12. Приложение 19 к Конвенции о международной гражданской авиации. – URL: <https://www.icao.int/safety/safetymanagement/pages/sarps.aspx>. (дата обращения: 01.01.2025).
13. Рекомендаций Конференции генеральных директоров гражданской авиации по глобальной стратегии в сфере безопасности полетов (Монреаль, 20–22 марта 2006 года) – URL: [https://www.icao.int/Meetings/AMC/MA/Directors%20General%20of%20Civil%20Aviation%20Conference%20on%20a%20Global%20Strategy%20for%20Aviation%20Safety%20\(DGCA-06\)/Concl\\_recom\\_corr1\\_en.pdf](https://www.icao.int/Meetings/AMC/MA/Directors%20General%20of%20Civil%20Aviation%20Conference%20on%20a%20Global%20Strategy%20for%20Aviation%20Safety%20(DGCA-06)/Concl_recom_corr1_en.pdf). (дата обращения: 01.01.2025).
14. Конференция высокого уровня по безопасности полетов (Монреаль, 29 марта – 1 апреля 2010 года) (HLSC/2010). – URL: <https://www.icao.int/events/high-level-safety-conference-2010> (дата обращения: 01.01.2025).
15. Толочко О. Н. Международное транспортное право: пособие для студентов / О. Н. Толочко. – URL: <https://elib.grsu.by/katalog/96310-147106.pdf> (дата обращения: 01.01.2025).
16. Международное право: учебник / отв. ред.: Ю. М. Колосов, В. И. Кузнецов. – М.: Междунар. отношения, 1996. – 608 с.
17. Курс международного права: в 7 т. / В. С. Верещетин, С. В. Виноградов, Г. М. Даниленко [и др.] – М.: Наука, 1992. – Т. 5. Отрасли международного права. – 336 с.
18. Приложение 2 к Конвенции о международной гражданской авиации. – URL: [https://applications.icao.int/postalhistory/annex\\_2\\_rules\\_of\\_the\\_air.htm](https://applications.icao.int/postalhistory/annex_2_rules_of_the_air.htm) (дата обращения: 01.01.2025).
19. Приложение 6 к Конвенции о международной гражданской авиации. – URL: [https://applications.icao.int/postalhistory/annex\\_6\\_operation\\_of\\_aircraft.htm](https://applications.icao.int/postalhistory/annex_6_operation_of_aircraft.htm) (дата обращения: 01.01.2025).
20. Травников, А. И. Международное аэронавигационное право: учеб. пособие / А. И. Травников. – М.: РУДН, 2013. – 201 с.
21. Приложение 11 к Конвенции о международной гражданской авиации. – URL: [https://applications.icao.int/postalhistory/annex\\_11\\_air\\_traffic\\_services.htm](https://applications.icao.int/postalhistory/annex_11_air_traffic_services.htm) (дата обращения: 01.01.2025).
22. Григорян, П. А. Международно-правовой режим авиационной безопасности: автореф. дис. ... канд. юрид. наук: 12.00.10 / П. А. Григорян. – М., 2010. – 25 с.
23. Хабачиров, М. Л. О формировании международного чрезвычайного права как новой отрасли международного права / М. Л. Хабачиров // Международное право. International Law. Practic. – 2010. – 2 (42). – С. 32–35.

24. Конохова, А. С. Международно-правовые основы противодействия неправомерным деяниям на воздушном транспорте : автореф. дис. ... канд. юрид. наук : 12.00.10 / А. С. Конохова. – М., 2017. – 32 с.
25. Приложение 17 к Конвенции о международной гражданской авиации. – URL: <https://www.icao.int/aviation-security-policy-section/Annex17> (дата обращения: 01.01.2025).
26. Конвенция о преступлениях и некоторых других действиях, совершаемых на борту воздушного судна : [заключена в г. Токио 14 сентября 1963 г.] // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 01.01.2025).
27. Конвенция о борьбе с незаконным захватом воздушных судов : [заключена в г. Гаага 16 декабря 1970 г.] // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 01.01.2025).
28. Конвенция о борьбе с незаконными актами, направленными против безопасности гражданской авиации [заключена в г. Монреаль 23 сентября 1971 г.] // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 01.01.2025).
29. Конвенция о борьбе с незаконными актами в отношении международной гражданской авиации: [заключена в г. Пекин 10 сентября 2010 г.] // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 01.01.2025).
30. Конвенция для унификации некоторых правил, касающихся международных воздушных перевозок : [заключена в г. Варшава 12 октября 1929 г.] // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 01.01.2025).
31. Конвенция для унификации некоторых правил международных воздушных перевозок : [заключена в г. Монреаль 28 мая 1999 г.] // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 01.01.2025).

## REFERENCES

1. Bordunov V.D., Kotov A.I., Maleev Y.N. Pravovoe regulirovanie mehdunarodnix poletov grachdanskix vozdyshnix sydov [Legal regulation of international flights of civil aircraft]. Moscow-Nauka, 1988, 209 p. (in Russian).
2. Kapustin A.Y. Mezhdunarodnoe pravo. V 2 tomax. T 2. Osobennaiia chact. Ychebnie dlia vyzov [International Law. In 2 volumes. Vol. 2. Special Part: textbook for universities. 2nd ed., revised and enlarged]. Moscow, Yurait Publishing House, 2022, 443 p. (in Russian).
3. Volkov M.M., Dezhkin V.N., Musatov V.N. Sovetskoe vozdyshnoe pravo. Ychebnoe posobie [Soviet air law. Textbook]. Leningrad, OLAGA, 1984. (in Russian).
4. Dezhkin V.N. Pravovoe regulirovanie mezdynarodnoi aeronavigatii. Autoref. diss. kand. urid. nauk [Legal regulation of international air navigation. Abstract of dissertation for candidate of legal sciences. Can. ped. sci. diss. abstract]. Leningrad, 1988. 42 p. (in Russian).
5. Travnikov A.I., Abashidze A.K. Mezhdunarodnoe vozdyshnoe pravo: ychebnik dlia vyzov, 2-e izdanie, perep. i dop. [International air law: textbook for universities / A. I. Travnikov [et al.]; edited by, 2nd ed., revised and enlarged]. Moscow-Yurait Publishing House, 2024. 474 p. (in Russian).
6. Grechukha V.N. Transportnoe pravo: pravovoe regulirovanie deiatel'nosti vozdyshnogo transporta. Monografiia [Transport law: legal regulation of air transport activities. Monograph] Available at: <https://www.consultant.ru> (Accessed 01.01.2025).
7. Boyko N.S. Vozdyshnoe pravo. Ychebnoe posobie dlia vyzov [Air Law. Textbook for Universities]. Moscow-Yurait, 2021, 217 p. (in Russian).
8. Kopylov M.N. Mezhdunarodno-pravovoe regulirovanie poletov vozdyshnix sydov nad otkritim morem [International legal regulation of aircraft flights over the open sea]. Moscow, 1980, 25 p. (in Russian).
9. Grinev I.V. Istorii stanovleniia instituta obespecheniia bezopasnosti poletov v kontekste formirovaniia sovetskogo vozdyshnogo prava [The history of the formation of the institute of flight safety in the context of the formation of Soviet air law]. Naychno-practigheskiu zhurnal "Aviazhionni vestnik" = Scientific and practical journal "Aviation Bulletin", 2024, no. 10, pp. 54-58 (in Russian).
10. Liu Sin. Formirovanie i razvitie mezdynarodno-pravovoi sistemy regulirovaniia mezdynarodnix poletov grazdanskix vozdyshnix sudov. Autoref. diss. kand. urid. nauk [Formation and development of the international legal system for regulating international flights of civil aircraft. Abstract for the dissertation of candidate of legal sciences 12.00.10].
11. ICAO Strategic Plan 2026-2050: Safe Skies. Sustainable Future. Available at: <https://www.icao.int/secretariat/SecretaryGeneral/Documents/ICAO%20Strategic%20Plan%202026-50-04.pdf>. (accessed 1 January 2025).
12. Prilozhenie 19 k Chikagskoi konvencii (Annex 19 to the Chicago Convention). Available at: <https://www.icao.int/safety/safetymanagement/pages/sarps.aspx/> (accessed 1 January 2025).
13. Directors General of Civil Aviation Conference on a Global Strategy for Aviation Safety (Montreal, 20-22 March 2006). Available at: [https://www.icao.int/Meetings/AMC/MA/Directors%20General%20of%20Civil%20Aviation%20Conference%20on%20a%20Global%20Strategy%20for%20Aviation%20Safety%20\(DGCA-06\)/Concl\\_recom\\_corr\\_1\\_en.pdf/](https://www.icao.int/Meetings/AMC/MA/Directors%20General%20of%20Civil%20Aviation%20Conference%20on%20a%20Global%20Strategy%20for%20Aviation%20Safety%20(DGCA-06)/Concl_recom_corr_1_en.pdf/) (accessed 1 January 2025).
14. High-Level Safety Conference (Montreal, 29 March – 1 April 2010) (HLSC/2010). Available at: <https://www.icao.int/events/high-level-safety-conference-2010/> (accessed 1 January 2025).
15. Tolochko O.N. Mezhdunarodnoe transportnoe pravo. Posobie dlia studentov [International transport law. Manual for students]. Available at: <https://elib.grsu.by/katalog/96310-147106.pdf> (accessed 5 January 2025).
16. Kolosov Y.M., Kuznetsov V.I. Mezhdunarodnoe pravo. Ychebnic [International Law. Textbook]. Moscow, International Relations, 1996, 608 p.
17. Vereshchetin V.S., Vinogradov S.V., Danilenko G.M. Kurs mezdunarodnogo prava. V 7 t. T. 5. Otrashi mezdunarodnogo prava [Course of international law. In 7 volumes. Vol. 5. Branches of international law]. Moscow, Nauka, 1992, 336 p.
18. Prilozhenie 2 k Chikagskoi konvencii (Annex 2 to the Chicago Convention). Available at: [https://applications.icao.int/postalhistory/annex\\_2\\_rules\\_of\\_the\\_air.htm](https://applications.icao.int/postalhistory/annex_2_rules_of_the_air.htm) (accessed 5 January 2025).
19. Prilozhenie 6 k Chikagskoi konvencii [Annex 6 to the Chicago Convention] Available at: [https://applications.icao.int/postalhistory/annex\\_6\\_operation\\_of\\_aircraft.htm](https://applications.icao.int/postalhistory/annex_6_operation_of_aircraft.htm) (accessed 5 January 2025).
20. Travnikov A.I. Mezhdunarodnoe aeronavigacionnoe pravo : uchebnoe posobie [International air navigation law: textbook]. Moscow-RUDN, 2013. 201 p.
21. Prilozhenie 11 k Chikagskoi konvencii [Annex 11 to the Chicago Convention]. Available at: [https://applications.icao.int/postalhistory/annex\\_11\\_air\\_traffic\\_services.htm/](https://applications.icao.int/postalhistory/annex_11_air_traffic_services.htm/) (accessed 5 January 2025).
22. Grigoryan P.A. Mezhdunarodno-pravovoi rezhim aviacionnoi bezopasnosti. Autoref. diss. kand. urid. nauk [International legal regime of aviation security. Abstract of dissertation for candidate of legal sciences. Can. ped. sci. diss. abstract]. Moscow, 2010, 25 p.
23. Khabachirov M.L. O formirovaniu mezdunarodnogo chrezvichainogo prava kak novoi otrashi mezdunarodnogo prava [On the formation of international emergency law as a new branch of international law]. Internation Law. Praxic. 2 (42) 2010, pp. 32-35.
24. Konyukhova A.S. Mezhdunarodno-pravovii osnovi protivodeistviia nepravomernim deianiam na vozduzhnom transporte. Autoref. diss. kand. urid. nauk [International legal framework for combating illegal acts in air transport. Abstract for the dissertation of candidate of legal sciences 12.00.10]. Moscow, 2017, 32 p.
25. Prilozhenie 17 k Chikagskoi konvencii (Annex 17 to the Chicago Convention). Available at: <https://www.icao.int/aviation-security-policy-section/Annex17> (accessed 5 January 2025).
26. Konvensia o prestupleniiah i nekotorigh drygix deistviiah, sovershaemix na borty vozduzhnogo sudna [Convention on Offences and Certain Other Acts Committed on Board Aircraft]. Avaiable at: STANDARD. International treaties / National Center of Legislation and Legal Information. Republic of Belarus (accessed 5 January 2025).
27. Konvensia o borbe s nezakonnim zaxvatom vozdushnix sudov [Convention for the Suppression of Unlawful Seizure of Aircraft]. Avaiable at: STANDARD. International treaties / National Center of Legislation and Legal Information. Republic of Belarus (accessed 5 January 2025).
28. Konvensia o borbe s nezakonnimi aktami, napravlennimi protiv bezopasnosti grachdanskoi aviatsii [Convention for the Suppression of Unlawful Acts against the Safety of Civil Aviation]. Avaiable at: STANDARD. International treaties / National Center of Legislation and Legal Information. Republic of Belarus (accessed 5 January 2025).
29. Konvensia o borbe s nezakonnimi aktami v otnoshenii mezdunarodnoi grazdanskoi aviatsii [Convention for the Suppression of Unlawful Acts Relating to International Civil Aviation]. Avaiable at: STANDARD. International treaties / National Center of Legislation and Legal Information. Republic of Belarus (accessed 5 January 2025).
30. Konventsiya dlia unifikatsii nekotorigh pravil, kasayushchikhsya mezdunarodnykh vozdushnykh perevozok (Convention for the Unification of Certain Rules Relating to International Carriage by Air). Avaiable at: STANDARD. International treaties / National Center of Legislation and Legal Information. Republic of Belarus (accessed 5 January 2025).
31. Konvensia dlia unifikatsii nekotorigh pravil mezdunarodnix vozdyshnix perevozok (Convention for the Unification of Certain Rules for International Carriage by Air). Avaiable at: STANDARD. International treaties / National Center of Legislation and Legal Information. Republic of Belarus (accessed 5 January 2025).

*Статья поступила в редакцию  
01.06.2025*

# Уважаемые авторы, приглашаем к публикации!



## Какие преимущества дает публикация в научно-практическом журнале «Авиационный вестник»?

- Допуск к защите диссертации;
- публикация в издании, зарегистрированном ВАК Республики Беларусь;
- повышение рейтинга в академическом и научном сообществах;
- возможность участия в научных дискуссиях с профессионалами;
- создание положительного имиджа исследователя;
- возможность продвинуться вверх по карьерной лестнице.



# ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

# ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЧЕЛОВЕЧЕСКИХ ОШИБОК В АВИАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

## PSYCHOPHYSIOLOGICAL BASES OF HUMAN ERRORS IN AVIATION ACTIVITIES

**Машарский Захар Владимирович** – кандидат психологических наук, декан факультета гражданской авиации учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь  
dism@mail.ru

**Zahar Masharsky** – Candidate of Psychological Sciences, Dean of the Faculty of Civil Aviation of the Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus  
dism@mail.ru

**Машарская Ольга Сергеевна** – кандидат психологических наук, ведущий кафедрой андрагогики Института повышения квалификации и переподготовки учреждения образования «Белорусский государственный педагогический университет имени М. Танка», Республика Беларусь  
saveleva.o.s@gmail.com

**Olga Masharskaya** – Candidate of Psychological Sciences, Head of the Department of Andragogy at the Institute of Advanced Training and Retraining of the M. Tank Belarusian State Pedagogical University, Republic of Belarus  
saveleva.o.s@gmail.com

**Аннотация:** человеческий фактор – это наука о взаимодействии человека с окружающей средой. В гражданской авиации это изучение влияния на поведение авиационных специалистов таких аспектов, как эргономика, функционирование различных органов тела, эмоциональное состояние, а также взаимодействие и коммуникация с другими членами авиационного сообщества. В данной статье рассматривается проблема человеческих ошибок в авиационной деятельности с психофизиологической точки зрения. Подчеркивается, что ошибки – это не результат халатности или недостаточной квалификации, а закономерное следствие естественных ограничений психики и организма человека. Предложена систематизация психофизиологических опасностей, разделенных на четыре группы: функционирование психики, аналитических систем, организма в целом и профессиональная деятельность. Для каждого фактора даны краткое описание и рекомендации по профилактике. Обоснована необходимость перехода от поиска «виновных» к формированию устойчивой профессиональной надежности авиационного персонала посредством повышения осведомленности, развития навыков саморегуляции, усиления взаимоконтроля и оптимизации организационно-психологической среды.

**Ключевые слова:** фактор, авиационный специалист, ошибка, авиационная деятельность, психофизиология, среда.

**Abstract:** human factors is the science of how people interact with their environment. In civil aviation, this is the study of how the behavior of aviation specialists is influenced by such aspects as ergonomics, the functioning of various bodily organs, emotional state, as well as interaction and communication with other members of the aviation community. This article examines the problem of human error in aviation activities from a psychophysiological perspective. It emphasizes that error is not the result of negligence or insufficient qualifications, but a natural consequence of the natural limitations of the human psyche and body. A systematization of psychophysiological hazards is proposed, classified into four groups: the functioning of the psyche, analytical systems, the body as a whole, and professional activity. A brief description and recommendations for prevention are provided for each factor. The need for a transition from the search for the "guilty" to the formation of sustainable professional reliability of aviation personnel through raising awareness, developing self-regulation skills, strengthening mutual control, and optimizing the organizational and psychological environment is substantiated.

**Keywords:** factor, aviation specialist, error, aviation activity, psychophysiology, environment.

### Введение

Статистика аварийности на воздушном транспорте свидетельствует, что почти все авиационные происшествия, обусловленные фактором «авиационный персонал», имеют причинные связи с человеческими ошибками. Ошибка человека – неизбежный фактор деятельности, и первопричиной здесь являются природные, психические и психофизиологические ограничения человеческой психики и организма в целом. Отсюда следует, что человек не защищен

от ошибки, и это вытекает из особенностей его деятельности.

До недавнего времени считалось, что если человек хорошо обучен и умеет профессионально делать свою работу, то его ошибка есть следствие халатности, или невнимательности, или небрежности, или рассеянности, за что он либо сам пострадал, либо его следует наказывать. Но отношение к ошибкам изменилось, как только авиационным сообществом было выяснено, что с психофизиологической точки зрения людей, которые не совершали ошибок, вообще не существует.

В практике расследования авиационных событий, обусловленных признаком «авиационный персонал», те, кто определяет их причину, зачастую основываются на прямой очевидности — «ошибка специалиста», без установления причинно-следственных связей [1].

При таком административно-обвинительном подходе ошибка рассматривалась как конечная (искомая) истина, а не как отправная точка для выяснения причинно-следственных связей. На основании вердикта «ошибка специалиста» человека обвиняли в случившемся. Казалось бы, все делалось «правильно»: и ошибки выявлялись, и «виновники» наказывались, и профилактические мероприятия разрабатывались, а предотвратить повторяемость подобных событий так и не удавалось. В результате, спустя некоторое время, подобные события вновь повторялись, но уже другими авиационными специалистами и даже с более тяжелыми последствиями.

Очевидно, такой метод расследования по существу сводился к поиску виноватого, а разрабатываемые профилактические меры не были эффективными. Ошибка — это неизбежный результат естественных пределов человеческих возможностей и работы сложных систем.

В системе «человек (авиационный специалист) — самолет — окружающая среда» каждый элемент характеризуется собственным набором потенциально опасных факторов. Эти факторы — следствие ограниченности возможностей или сбоя в работе отдельных психических, физических систем и организма авиаспециалиста в определенных рабочих и жизненных обстоятельствах. Как результат, эффективность и безопасность его взаимодействия с авиационной техникой снижаются.

Психофизиологические риски — это проявление ограничений или нарушений, возникающих в определенных обстоятельствах функционирования физиологических систем и организма в целом, что негативно сказывается на надежности профессиональной деятельности.

Несмотря на глубокое понимание особенностей воздушного судна и влияния окружающей среды, авиационные специалисты не всегда в полной мере осознают закономерности работы собственного организма, его систем и функций в различных условиях полета и технического обслуживания. Это влечет за собой дезорганизацию деятельности и принятие ошибочных решений, что, в свою очередь, снижает профессиональную надежность и повышает вероятность ошибок.

Далее будут рассмотрены основные психофизиологические опасные факторы (ПФОФ), которые неоднократно становились причинами возникновения неблагоприятных ситуаций, приводивших к авиационным инцидентам и катастрофам.

### **Основная часть**

В авиационной сфере психофизиологические опасности классифицируются по четырем различным категориям:

- факторы, связанные с особенностями психической деятельности: доминирующее состояние, преждевременное снижение психической активности, состояние дремоты, психическое оцепенение, искажение мотивации, влияние психической установки, ощущение завершенности действий, недостаточная

психическая готовность, ошибочные реакции, провалы в памяти, временной рефлекс, эффект присутствия руководителя;

- факторы, связанные с функционированием органов чувств: ухудшение зрения в условиях низкой освещенности (сумеречное и ночное зрение), отсутствие восприятия, путаница в восприятии, нарушение функциональности анализаторов;

- факторы, обусловленные общим состоянием организма: монотонность, болезни, стрессовое состояние;

- факторы, связанные со спецификой профессиональной деятельности: негативное влияние ранее приобретенных навыков, несоответствие структуры деятельности текущим условиям, проблемы в межличностном взаимодействии внутри коллектива.

В дальнейшем будет представлен краткий анализ каждого из вышеуказанных факторов риска и предложены рекомендации по их предотвращению.

### ***ПФОФ, обусловленные особенностями функционирования психики***

#### ***ПФОФ «Доминантное состояние»***

Доминантное состояние — это устойчивые мысли или переживания, формирующиеся под влиянием обстоятельств (как внутренних, так и внешних), которые затрудняют концентрацию внимания авиаспециалиста на актуальных задачах, диктуемых текущими условиями. Одной из возможных проблем является излишнее сосредоточение на предстоящем процессе. Предотвратить развитие доминантных состояний можно путем понимания их физиологических основ и причин появления, освоения техник осознанного переключения внимания между посторонними мыслями и работой, тщательного планирования подготовки к задаче, избегая чрезмерной психологической предвзятости, эффективного разделения обязанностей и взаимного контроля при работе в команде, а также предотвращения ситуаций, требующих навыков, превышающих компетенцию специалиста.

#### ***ПФОФ «Преждевременная психическая демобилизация»***

Преждевременная психическая демобилизация — это выраженное снижение активности летчика (расслабление) в тот момент, когда основная деятельность еще не завершена. Подобные изменения в психике часто возникают во время авиационной деятельности после решения сложных задач, которые истощили ресурсы человека как умственные, так и физические. Парадоксально, что при этом среди других членов коллектива нередко наблюдается неоправданная расслабленность. В некоторых случаях после успешного выполнения трудного задания или выхода из критической ситуации у авиаспециалиста может появиться чувство повышенного благополучия.

Предотвращение преждевременной потери боеспособности заключается в знании психофизиологических особенностей этого состояния и причин его возникновения, поддержании необходимого уровня активности мозга посредством саморегуляции и недопущении излишней релаксации до окончания выполнения поставленной задачи, а также владении методами управления психическим состоянием в зависимости от типа работы.

*ПФОФ «Дремотное состояние»*

Дремотное состояние — значимый психофизиологический риск, особенно при продолжительной работе в ночное время. Монотонность окружающей среды, успокаивающие звуки и ограниченная двигательная активность авиационного персонала способствуют падению психической активности и преобладанию процессов торможения в коре головного мозга.

Предупреждение полусонного состояния заключается в понимании его психофизиологических механизмов и факторов, способствующих его возникновению, в строгом соблюдении сбалансированного режима работы, отдыха и питания, в осознанном поддержании необходимого уровня бодрости во время работы и в налаженной системе взаимоконтроля в команде, предотвращающей засыпание у отдельных сотрудников.

*ПФОФ «Психическая огуленность»*

Психическая огуленность, представляющая собой психофизиологический риск, развивается под влиянием экстремально интенсивных разовых раздражителей. Зачастую, такими раздражителями становятся внезапные и угрожающие изменения в окружающей среде. К примеру, расхождение показаний приборов в полете, возникновение задымления в кабине без видимой причины, громкий взрыв в двигателе и тому подобное. В подобных ситуациях психическая реакция может проявляться в виде ступора и полного бездействия на протяжении некоторого времени, либо, напротив, в виде чрезмерной двигательной активности, когда действия утрачивают логичность и становятся беспорядочными.

Для предотвращения психической огуленности необходимо: понимание психологической природы данного явления, развитие у специалистов высокой степени психологической готовности к действиям в нестандартных ситуациях, возникающих в авиации, а также создание эффективной системы взаимодействия в команде, позволяющей оказывать поддержку при возникновении психической огуленности у одного из ее участников.

*ПФОФ «Феномен сознательного искажения мотива»*

Феномен сознательного искажения мотива деятельности — относительно редкое, но потенциально опасное явление в авиации, подтверждаемое практическим опытом. Оно заключается в том, что авиационный специалист, под влиянием личных убеждений или предубеждений, сознательно планирует изменить свои профессиональные мотивы перед выполнением конкретной задачи. Часто это связано с негативными чертами характера, такими как стремление выделиться за счет демонстрации умения справляться со сложными ситуациями, которые он сам инициировал.

Для предотвращения сознательного искажения мотива деятельности необходим углубленный анализ индивидуальных особенностей каждого сотрудника авиационной сферы, проведение воспитательной работы и развитие у специалистов навыков самоконтроля и осознанного управления своими мотивами, целями и действиями [4].

*ПФОФ «Феномен психической установки»*

Феномен психической установки на выполняемую деятельность (действие), как правило, оказывает бла-

гоприятное влияние, обеспечивая предварительную адаптацию физиологических систем авиационного персонала к конкретной задаче. Тем не менее, эта положительная сторона имеет и обратную, негативную сторону. В частности, фиксация на определенной информации или действии может приводить к искаженному восприятию новой информации, когда она интерпретируется как ожидаемая. Кроме того, такая установка способна затруднить быстрое переключение на иные действия, что может быть необходимо в меняющихся обстоятельствах.

Предупреждение негативных последствий психической установки включает в себя: глубокое понимание ее психологической природы, осознанный контроль соответствия воспринимаемой информации и совершаемых действий заданным параметрам, а также организацию эффективного взаимного контроля в рабочей группе, позволяющего своевременно выявлять и предотвращать ошибки, допущенные одним из участников.

*ПФОФ «Феномен выполненности действий»*

Феномен выполненности действий возникает, когда авиационный специалист убежденно сообщает о завершении задачи, хотя фактически она не была выполнена. Это кажущееся действие возникает при наличии трех предпосылок: стремления к реализации запланированного действия, осознания актуальности и возможности выполнения действия, которое в данный момент не входит в план. Комбинация этих факторов формирует субъективное впечатление о правильно выполненной работе.

Предотвращение феномена выполненности действий включает в себя осведомленность о данном явлении и его психологических корнях, постоянный контроль за всеми действиями, особенно на сложных этапах работы, создание эффективного взаимодействия и взаимоконтроля в команде, исключающего возможность ошибок со стороны любого участника.

*ПФОФ «Феномен низкой психической готовности»*

Феномен низкой психической готовности — серьезный психофизиологический опасный фактор, негативно отражающийся на эффективности деятельности авиаспециалиста в особых ситуациях. Это проявляется в растерянности, замедленности реакций или, наоборот, в суетливости, неадекватности действий. Страдают восприятие информации, мыслительная деятельность, управляющие воздействия. Психическая готовность включает два компонента: 1) психофизиологическую устойчивость, обусловленную состоянием организма и 2) психическую устойчивость, определяемую уровнем профессиональной подготовки и общим функциональным состоянием основных психических качеств личности. Профилактика феномена низкой психической готовности: знание его истинной природы, проведение специальных тренировок, направленных на формирование психофизиологической устойчивости, формирование психической устойчивости путем выполнения в процессе деятельности упражнений с внезапным введением отказов функциональных систем и других особых ситуаций, строгое соблюдение режима труда, отдыха и питания, обеспечивающего высокие функциональные резервы организма.

#### *ПФОФ «Феномен ошибочного реагирования»*

Феномен ошибочного реагирования характерен для маловероятных событий. Это обусловлено тем, что в процессе деятельности у авиаспециалиста вырабатываются реакции не только на конкретные сигналы, но и на их вероятностную структуру. Поэтому в тот или иной момент он непроизвольно (или произвольно, т. е. сознательно) прогнозирует возникновение более вероятного события, из-за чего маловероятное неординарное явление может пропустить. Профилактика феномена ошибочного реагирования: знание, что первый нештатный сигнал, как правило, связан не с одной, а с двумя и более особыми ситуациями; не допускать принятия решения об опасной ситуации только по одному первому нештатному сигналу; для опознания случившегося актуализировать (вспомнить) все возможные особые ситуации, а затем выдвинуть гипотезу об опасной ситуации, имеющей минимальное резервное время, и найти признаки, подтверждающие ее. Если такие признаки не обнаружены, то выдвигается гипотеза следующей опасной ситуации, резервное время которой больше, чем первой.

#### *ПФОФ «Феномен забывания»*

Феномен забывания выполнения определенных действий представляет собой один из психофизиологических факторов риска, потенциально способных спровоцировать авиакатастрофу. В основе этого явления лежит дисфункция механизмов памяти. Под памятью подразумевается психологический процесс, включающий в себя запечатление, хранение и последующее воспроизведение или узнавание ранее воспринятой, осмысленной, прочувствованной или совершенной информации.

Интенсивность забывания зависит в первую очередь от прочности фиксации материала в памяти. В некоторых случаях нарушается именно механизм извлечения информации, которая фактически сохранена в памяти.

В целях предотвращения забывания необходимо: обеспечить надежное запоминание информации либо путем многократного повторения (механическое заучивание), либо путем глубокого понимания смысла (логическое запоминание). Рекомендуется повторять материалы с 8:00 до 12:00 и с 14:00 до 17:00, а в особо критических ситуациях — непосредственно перед сном в течение 20–30 минут. Периодическое освежение материала в памяти помогает предотвратить его угасание. Следует проявлять повышенную внимательность при выполнении задач, особенно если условия их выполнения отличаются от привычных.

#### *ПФОФ «Рефлекс на время»*

Психологическая суть рефлекса на время состоит в том, что постоянное выполнение какого-то действия в строго определенное время (или появление объекта, возникновение явления и т. п.) приводит к приобретению временем сигнального для авиаспециалиста значения. И в очередной раз авиаспециалист, даже при изменении обстановки, может выполнить в определенное время то же действие, но оно оказывается уже ошибочным (в связи с изменением ситуации). Наоборот, бывают случаи, когда время требует выполнения действия, но условия не соответствуют, поэтому у авиаспециалиста формируется внутреннее беспокойство, неудовлетворенность.

Профилактика феномена «Рефлекс на время»: знание его психологической природы и условий наиболее частого проявления, обязательное восприятие необходимой для принятия правильного решения визуальной информации, использование рефлекса на время как упреждающего сигнала, нацеливающего на контроль соответствующей визуальной информации.

#### *ПФОФ «Феномен присутствия старшего»*

Появление стороннего наблюдателя, будь то проверяющий или вышестоящий руководитель, заметно влияет на психологическую атмосферу в рабочей среде, создавая напряженность. Это приводит к изменению структуры общения внутри коллектива, где внимание всех сконцентрировано на руководителе. Оценка работы каждого специалиста подвергается искажению, ведь ошибки начальства остаются без внимания, а взаимоконтроль ослабевает. Этот эффект особенно заметен при значительной разнице в возрасте, звании или должности между членами коллектива и вышестоящим руководителем.

Для предотвращения негативного влияния присутствия старшего необходимо понимать психологическую природу этого явления. Важно, чтобы руководитель поддерживал здоровый психологический климат в коллективе, предотвращая кардинальные изменения в привычной работе сотрудников. Следует сохранять систему взаимоконтроля, распространяющуюся на всех, включая руководителя, с возможностью указания на его ошибки. Необходимо развивать у членов коллектива способность сохранять привычный стиль работы даже в присутствии вышестоящего руководства.

#### *ПФОФ, обусловленные особенностями функционирования анализаторных систем*

##### *ПФОФ «Сумеречное и ночное зрение»*

Зрение в условиях низкой освещенности, как в сумерках, так и ночью, определяется в первую очередь ясностью восприятия (способностью глаза различать детали), процессом адаптации зрительной системы к уменьшенному количеству света (светочувствительностью), а также возможностью оценки пространства. Ночное зрение является бесцветным, воспринимая лишь оттенки серого, так как палочки, отвечающие за зрение в темноте, не различают цвета. Помимо снижения остроты, в темноте ухудшается и способность различать контрастность.

Максимальная острота зрения в условиях слабой освещенности достигается лишь после того, как глаза адаптируются к определенному уровню естественного света. Время, необходимое для полной темновой адаптации, зависит от яркости окружающего освещения: в сумерках это занимает от 10 до 15 минут, при луне без облаков — от 25 до 30 минут, а при облачной погоде в полнолуние — от 30 до 40 минут. Стоит отметить, что адаптация к темноте быстро нарушается (за несколько секунд) при воздействии яркого света на глаза.

Для предотвращения ухудшения зрения в условиях низкой освещенности необходимо знать особенности его функционирования. Перед выполнением работы, требующей хорошего зрения в темноте, рекомендуется находиться в помещении с приглушенным светом. Следует избегать просмотра телепере-

дач, внезапного воздействия яркого света (например, отводя взгляд от источников света), регулировать уровень освещения, снижая яркость до минимально необходимого уровня.

#### *ПФОФ «Феномен невосприятия»*

Эффект неосознания возникает, когда изменение какого-либо параметра в ходе работы не достигает порога чувствительности авиационного специалиста. Этот опасный психофизиологический фактор обусловлен пониженной восприимчивостью определенных органов чувств человека к изменениям параметров.

Предупреждение эффекта неосознания включает в себя понимание его физиологических основ, регулярный контроль всех параметров по приборам (особенно в условиях облачности), избегая при этом длительных перерывов в наблюдениях.

#### *ПФОФ «Феномен перепутывания»*

Явление перепутывания выражается в неточностях при перемещении рук к элементам управления системами. Когда зрительный контроль за движением и размещением руки на нужном элементе управления (кнопке, рычаге и т. п.) отсутствует, управление этими действиями базируется на информации, идущей напрямую от перемещаемой руки. Эта информация — кинестетическая (от мышц и сухожилий) и тактильная (от кожи). Она имеет некоторую точность, но ее часто недостаточно, чтобы избежать ошибочного перемещения руки и выполнения действий с не тем элементом управления, который требуется.

Предотвращение явления перепутывания заключается в понимании его физиологических основ, обязательном визуальном контроле точности размещения руки на нужном элементе управления, особенно когда рядом располагаются два похожих элемента управления.

#### *ПФОФ «Нарушение работоспособности анализаторов»*

Ключевым фактором, влияющим на надежность авиационного персонала, является ухудшение функциональности основных сенсорных систем, в первую очередь зрительной и слуховой, которые обеспечивают оператора критически важной информацией для выполнения задач. Сбои в работе органов чувств приводят к ухудшению качества их функционирования: для зрения это проявляется в снижении остроты, ухудшении контрастной чувствительности, повышении порогов восприятия и прочих негативных изменениях; для слухового анализатора — в снижении слуха, ухудшении способности различать звуки и т. д. Как следствие, авиаспециалист может допускать ошибки в процессе визуального и аудиального восприятия.

Предупреждение нарушений в работе сенсорных систем включает в себя: понимание психофизиологических основ этого явления, применение всего спектра доступных мер, направленных на поддержание функциональности органов зрения и слуха, а также использование дублирующих каналов для получения информации (как зрительной, так и слуховой), играющей решающую роль в обеспечении безопасности полетов.

### *ПФОФ обусловленные особенностями функционирования организма в целом*

#### *ПФОФ «Монотония»*

Состояние психической заторможенности, характеризующееся усиленным чувством утомления и желанием спать, замедленной реакцией и сложностью переключения внимания, а также нестабильностью и ухудшением качества работы, определяется как монотония. Причинами этого состояния служат: однообразная обстановка, дефицит внешних стимулов, узкий угол обзора, рутинный и продолжительный характер работы с невысокой сложностью задач. Усугубляющими факторами являются недостаточное освещение рабочей зоны (особенно в ночное время), отсутствие возможности двигательной активности, а также наличие монотонных шумов.

Монотония развивается, когда умственное напряжение и концентрация внимания существенно снижаются из-за сложившихся обстоятельств. Дальнейшее падение психического тонуса может спровоцировать наступление сонного состояния различной глубины.

Предупреждение монотонии включает в себя: понимание причин ее возникновения, регулярное выполнение физических упражнений во время работы, сознательную смену деятельности на задачи, требующие большего внимания и повышающие умственную активность, оптимизацию темпа и ритма работы, а также чередование работы и отдыха, улучшение освещения рабочего места, если оно было недостаточным.

#### *ПФОФ «Заболевание»*

Болезнь, хоть и возникает нечасто, способна привести к ухудшению профессиональной деятельности авиационного работника, вплоть до ее полной утраты. Скрытие недуга и самостоятельное лечение приводят к тому, что авиаспециалист, используя неподходящие медикаменты, лишь временно уменьшает выраженность признаков болезни, не достигая реального оздоровления.

Предупреждение развития данного явления включает в себя осознание авиаспециалистом важности проблемы сокрытия заболевания, понимание, как это влияет на его работоспособность и безопасность полетов. Важно своевременно информировать врача о любых замеченных изменениях в состоянии здоровья, не утаивая никакой информации. Необходимо также отказаться от самолечения.

#### *ПФОФ «Стресс»*

Выявлено, что умеренное увеличение нервно-психического напряжения способствует повышению эффективности работы авиационного персонала по сравнению с их обычным, спокойным состоянием. Однако, когда напряжение перерастает в стресс, наблюдается ухудшение показателей: затрудняется мыслительный процесс, усложняется выполнение комплексных или незнакомых задач, увеличивается вероятность ошибок в восприятии, пропускаются важные этапы операций, ухудшается концентрация и переключение внимания, поле зрения становится более узким, искажается восприятие времени, возникают кратковременные потери памяти, появляется дезориентация, движения становятся резкими и импульсивными, либо, напротив, проявляется скованность и замедленность реакций.

Чрезмерное нервно-эмоциональное напряжение и стресс могут быть вызваны недостаточной квалификацией специалиста для решения конкретной задачи, особенно при переподготовке или освоении новой техники, либо его неподготовленностью к неожиданному усложнению ситуации, а также слабой психологической устойчивостью.

Для предотвращения стресса, который негативно сказывается на работоспособности пилота, необходимо, учитывая причины его возникновения, реализовать следующие меры: повысить уровень профессиональной подготовки авиаспециалистов и избегать ситуаций, превышающих их психологические и профессиональные возможности, проводить тренировки на симуляторах с моделированием внезапных сложных ситуаций, что позволит не только отработать навыки, необходимые для действий в подобных условиях, но и укрепить психологическую устойчивость, предотвращающую развитие стресса.

### *ПФОФ, обусловленные особенностями профессиональной деятельности*

#### *ПФОФ «Отрицательный перенос навыка»*

Явление «отрицательного переноса» умений является ключевым фактором, провоцирующим систематические ошибки авиационного персонала в процессе переподготовки и освоения новой техники. Причина заключается в том, что переход на новый самолет, отличающийся компоновкой оборудования и методами его использования, приводит к формированию у специалиста иной структуры деятельности (динамического стереотипа).

Следует отметить, что в памяти специалиста сохраняется и предыдущая структура деятельности, доведенная до автоматизма длительным опытом работы на старом типе воздушного судна. В ситуациях, когда ослабевает сознательный контроль за правильностью выполняемых операций, может активизироваться прежний стереотип, как наиболее прочно закрепившийся в памяти, что, безусловно, приведет к совершению ошибки.

Для предотвращения отрицательного переноса умений необходимо: понимать причины и условия его возникновения; обладать информацией о системах нового самолета, отличающихся от аналогичных на предыдущих моделях; на протяжении всего времени переобучения и адаптации к новому типу воздушного судна постоянно контролировать свои действия (при чтении показаний приборов, работе с переключателями и т. п.); помнить о возможности «активации» старого стереотипа.

#### *ПФОФ «Феномен несоответствия структуры деятельности условиям»*

Феномен несоответствия структуры деятельности условиям наблюдается при внезапном изменении последних и проявляется прежде всего в ошибках восприятия, управляющих движений, снижением ка-

чества выполнения поставленных задач. Ошибки восприятия часто встречаются при изменении внешних условий.

Профилактика феномена несоответствия структуры деятельности условиям: знание его природы и механизмов проявления, учет авиаспециалистом изменившихся условий и обстоятельств полета в организации, содержании и структуре своей деятельности.

### *ПФОФ «Нарушение взаимодействия в коллективе»*

Возникновение опасных инцидентов часто обусловлено сбоями в координации между участниками команды при выполнении общих задач. Эффективность совместной работы определяется не только уровнем квалификации каждого отдельного члена команды, но также и качеством организации взаимодействия, гармоничным сочетанием профессионального мастерства, совместимости, стажа совместной работы и прочих факторов. Хорошо отлаженное взаимодействие способствует повышению надежности и результативности работы благодаря формированию возможностей для взаимозаменяемости и контроля выполняемых действий.

Предотвращение нарушений взаимодействия в команде включает в себя осознание опасности этого фактора в возникновении, развитии и последствиях неблагоприятных ситуаций, совершенствование навыков взаимодействия в команде при разрешении критических ситуаций посредством их моделирования, а также обеспечение психологической совместимости членов команды.

### **Заключение**

Резюмируя вышесказанное, стоит отметить, что человеческая ошибка в авиационной деятельности — не результат халатности или недостаточной квалификации, а закономерное проявление природных психических и психофизиологических ограничений человека. Современный подход к расследованию авиационных происшествий уже не сводится к поиску «виновного», а направлен на выявление глубинных причинно-следственных связей, обусловленных взаимодействием человека, техники и среды [6].

Ключевым выводом является необходимость системного подхода к профилактике ошибок: не только повышение индивидуальной подготовки и осознанности специалистов, но и создание безопасной организационной среды — с четким взаимоконтролем, рациональным распределением задач, психологической совместимостью в коллективе и соблюдением режимов труда и отдыха. Эффективная профилактика возможна только при глубоком понимании природы человеческих ошибок и отказе от упрощенного обвинительного подхода. Только такой подход позволяет не просто реагировать на происшествия, но и реально предотвращать их повторение.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Кузнецов, И. Б. Человеческий фактор в гражданской авиации / И. Б. Кузнецов. – СПб.: Политехника, 2019. – 102 с.
2. Меденков, А. А. Человеческий фактор в авиации и космонавтике / А. А. Меденков, М. В. Дворников, Т. Б. Нестеров. – М.: Полет, 2017. – 208 с.
3. Рыбалкин, В. В. Человеческий фактор и психологическая безопасность: учеб. пособие / В. В. Рыбалкин, А. Л. Рыбалкина. – М.: МГТУ ГА, 2016. – 136 с.
4. Психологические основы взаимодействия в экипаже: учеб. пособие / сост. Д. А. Евстигнеев, В. Х. Копысов. – Ульяновск: УВАУ ГА, 2017. – 194 с.
5. Дедушева, Л. А. Социология и психология управления / Л. А. Дедушева, М. Н. Кузина, Е. В. Астратенкова. – М.: Русайнс, 2019. – 352 с.
6. Толочек, В. А. Психология труда / В. А. Толочек. – СПб.: Питер, 2019. – 480 с.

**REFERENCES**

1. Kuznetsov I. B. Human Factor in Civil Aviation. St. Petersburg, Politekhnik, 2019, 102 p.
2. Medenkov A. A. Human Factor in Aviation and Cosmonautics. Moscow, Polet, 2017, 208 p.
3. Rybalkin V. V., Rybalkina A. L. Human Factor and Psychological Safety: a textbook. Moscow, Moscow State Technical University of Civil Aviation, 2016, 136 p.
4. Psychological Foundations of Crew Interaction: a textbook / compiled by D. A. Evstigneev, V. Kh. Kopysov. Ulyanovsk, UVAU GA, 2017, 194 p.
5. Dedusheva L.A., Kuzina M.N., Astratenkova E.V. Sociology and Psychology of Management. Moscow, Rusains, 2019, 352 p.
6. Tolochek V.A. Psychology of Labor. St. Petersburg, Piter, 2019, 480 p.

*Статья поступила в редакцию  
03.10.2025*

# 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 14 000 печатных знаков, но не превышать 40 000 печатных знаков (8–16 стр.). Рукописи большего объема принимаются только по специальному решению редакционной коллегии.

Статья должна быть выполнена в текстовом редакторе MS Word и отредактирована строго по следующим параметрам: ориентация листа – книжная, формат А4, поля по 2 см с каждой стороны, шрифт Times New Roman, кегль (для всей статьи кроме аннотации, ключевых слов и таблиц) – 14 пт, для таблиц – 12 пт, для аннотации и ключевых слов – 10 пт, междустрочный интервал – 1,5, 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.

Статья должна иметь следующую структуру:

**1. УДК** (номер тематической рубрики). Индекс статьи по Универсальной десятичной классификации набирается обычным шрифтом, с выравниванием по левому краю.

**2. Название статьи.** Должно содержать до 12 слов. Не допускается использовать в названии аббревиатуры и формулы. Набирается прописными буквами, начертание – полужирное, прямое без разбиения слов переносами, с выравниванием по центру строки, без абзацного отступа, без точки в конце. Рекомендуется, чтобы в названии статьи использовались ключевые слова.

**3. Инициалы и фамилия автора** (авторов) с обязательным указа-

нием организации аффилирования (места работы). Инициалы и фамилия автора набираются прописными буквами, с выравниванием по правому краю строки, без абзацного отступа, без точки в конце. Через запятую перечисляются все соавторы. После названия статьи указывается фамилия, имя и отчество (полностью) автора, ученая степень, ученое звание, должность и организация аффилирования (место работы) автора, страна, адрес электронной почты. Аналогичные данные всех соавторов указываются с новой строки.

**4. Аннотация** (авторское резюме) объемом 150–250 слов должна кратко представлять результаты работы и быть понятной, в том числе и в отрыве от основного текста статьи; должна быть информативной (не содержать общих фраз, общеизвестных положений), хорошо структурированной (один из вариантов написания аннотации – краткое повторение структуры статьи, включающее введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение или выводы). Текст должен быть лаконичен и четок, свободен от второстепенной информации, лишних вводных слов, исторических справок, если они не составляют основное содержание рукописи. Следует избегать сокращений и условных обозначений, кроме общеупотребительных, ссылки на литературные источники не приводятся.

**5. Ключевые слова** должны содержать 5–10 слов или 3–5 словосочетаний, которые отделяются друг от друга запятой. Ключевые слова должны отражать содержание текста в терминах объекта, научной отрасли и методов исследования.

**6. Метатекстовые данные** (информация, указанная в пунктах 2–5) в той же последовательности приводится на английском языке. Если статья англоязычная –

вышеуказанные данные приводятся на русском языке.

**7. Основной текст статьи** может включать рисунки и таблицы (до 7–8).

*Таблицы* набираются в редакторе MS Word. Таблицы должны иметь номера и названия, которые должны быть указаны над таблицами. Единственная таблица в публикации не нумеруется. Исползованные в таблице сокращения подлежат расшифровке в конце таблицы.

*Графический материал* (рисунки, чертежи, схемы, диаграммы, фотографии) должны представлять собой обобщенные материалы исследований. Не допускается составление рисунка из разрозненных элементов. Графический материал должен размещаться сразу после его первого упоминания в тексте, а также должен быть предоставлен в виде отдельных файлов в формате .jpg/ .png/ .cdr/ или .psd (Adobe Photoshop, без склеивания слоев) с разрешением не ниже 300 dpi). Желательно также предоставлять графические материалы в формате оригинала (Corel, диаграммы в Excel, Origin Pro и т. д.), т. е. в той программе, в которой они выполнены. Текст на рисунках набирается основной гарнитурой, причем начертание символов (греческое, латинское) должно соответствовать их начертанию в тексте. Все надписи, обозначения на всех графиках, рисунках, схемах должны быть достаточно крупными, легко читаемыми, выполненными одинаковым шрифтом. Размер кегля соизмерим с размером рисунка (кегель – не менее 8 пт). Названия и номера графического материала должны быть указаны под изображением. Элементы рисунков и кривые нумеруются курсивными арабскими цифрами, которые расшифровываются в подрисунковых подписях. Единственный рисунок в статье не нумеруется. График должен быть наглядным, иметь аккуратное и четкое

исполнение, должен легко читаться, для чего необходимо соблюдать следующие правила: координатные оси должны заканчиваться стрелками или штрихами; оси должны быть подписаны с указанием единиц измерения. Не допускается выход рисунков за границы текста на поля. Все рисунки должны обеспечивать простое масштабирование с сохранением взаимного расположения всех элементов и внутренних надписей.

*Формулы и математические символы.* Простые формулы и буквенные обозначения величин нужно вставлять, используя меню «Вставка. Символ». Формулы набираются с помощью встроенного в MS Word редактора формул MathType. Шрифт Times New Roman, кегль: основной текст – 14 пт, индекс – 10 пт. Буквы (прописные и строчные) латинского алфавита, обозначающие физико-математические величины, набирают курсивом. Русские, греческие буквы, сокращенные тригонометрические и математические термины (sin, cos, tg, arcsin, ln, lg, lim, const, min, max и т. д.) набирают прямым шрифтом. Нумеруются только те формулы, на которые автор ссылается по тексту.

*Иллюстрации, формулы и сноски* следует нумеровать в соответ-

ствии 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.

**8. Список использованных источников** должен включать в себя все работы, использованные автором в тексте, и оформлен на русском (белорусском) языке в соответствии с требованиями Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь. Цитируемая литература приводится общим списком по мере упоминания. Каждый источник должен иметь свой порядковый номер в списке.

Затем приводится список цитированных источников в романском алфавите (латиница) (References) со следующей структурой: авторы (транслитерация), название статьи в транслитерированном варианте [перевод названия статьи на ан-

лийский язык в квадратных скобках], название русскоязычного источника (транслитерация) [перевод названия источника на английский язык], выходные данные с обозначениями на английском языке. Транслитерация русскоязычных названий выполняется согласно стандарту BSI.

При оформлении списка литературы на английском языке (References) для транслитерации кириллицы используйте систему Board of Geographic Names (BGN).

Тире, а также символ // в описании на английском не используются.

Перечисляются все авторы материала через запятую. Фамилия и инициалы транслитерируются. Инициалы от фамилии запятой не отделяются.

Названия книг, журналов, материалов конференций, сборников, авторефератов и диссертаций транслитерируются и переводятся.

Транслитерация набирается курсивом, перевод – в квадратных скобках [].

Названия статей (составных частей) из журналов, сборников и т. д., а также патентов, законов, ГОСТ, СНБ, ТКП, СНиП, СанПиН и т. д. только переводятся.

*К печати принимаются статьи, отвечающие профилю журнала, не публиковавшиеся ранее в других изданиях.*

*Материал должен быть подписан всеми авторами.*

*Материалы, оформленные с нарушением требований или не прошедшие рецензирование (отклонены рецензентами) не публикуются.*

*Примеры оформления материалов статьи и транслитерации приведены на сайте [bga.by](http://bga.by).*



## 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)

### Психологические науки

(инженерная психология, эргономика, авиационная психология, человеческий фактор)

## 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. Выписка из протокола заседания кафедры или иной научной структуры с рекомендацией к опубликованию материалов статьи в научно-практическом журнале «Авиационный вестник».
3. 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).
4. Анкету автора (форму можно посмотреть на сайте академии в разделе Академия/Наука и инновации/Журнал «Авиационный вестник».
5. Материалы статьи и сопроводительные документы представляются в электронном и письменном виде согласно установленным требованиям.

- Электронную версию материалов присылать по адресу: [avia.vestnik@bgaa.by](mailto: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](http://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](mailto:avia.vestnik@bgaa.by)

Журнал основан в 2019 г. Выходит два раза в год.

Подписано в печать 01.12.2025. Формат 60x90/8. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 4,65. Тираж 120 экз. Заказ №3328.

Отпечатано: ООО «НАВИТЕХ».

ЛП №38200000018525 от 21.02.2017

Ул. Асаналиева, д. 84/2, каб. 5, 220024, г. Минск, Республика Беларусь