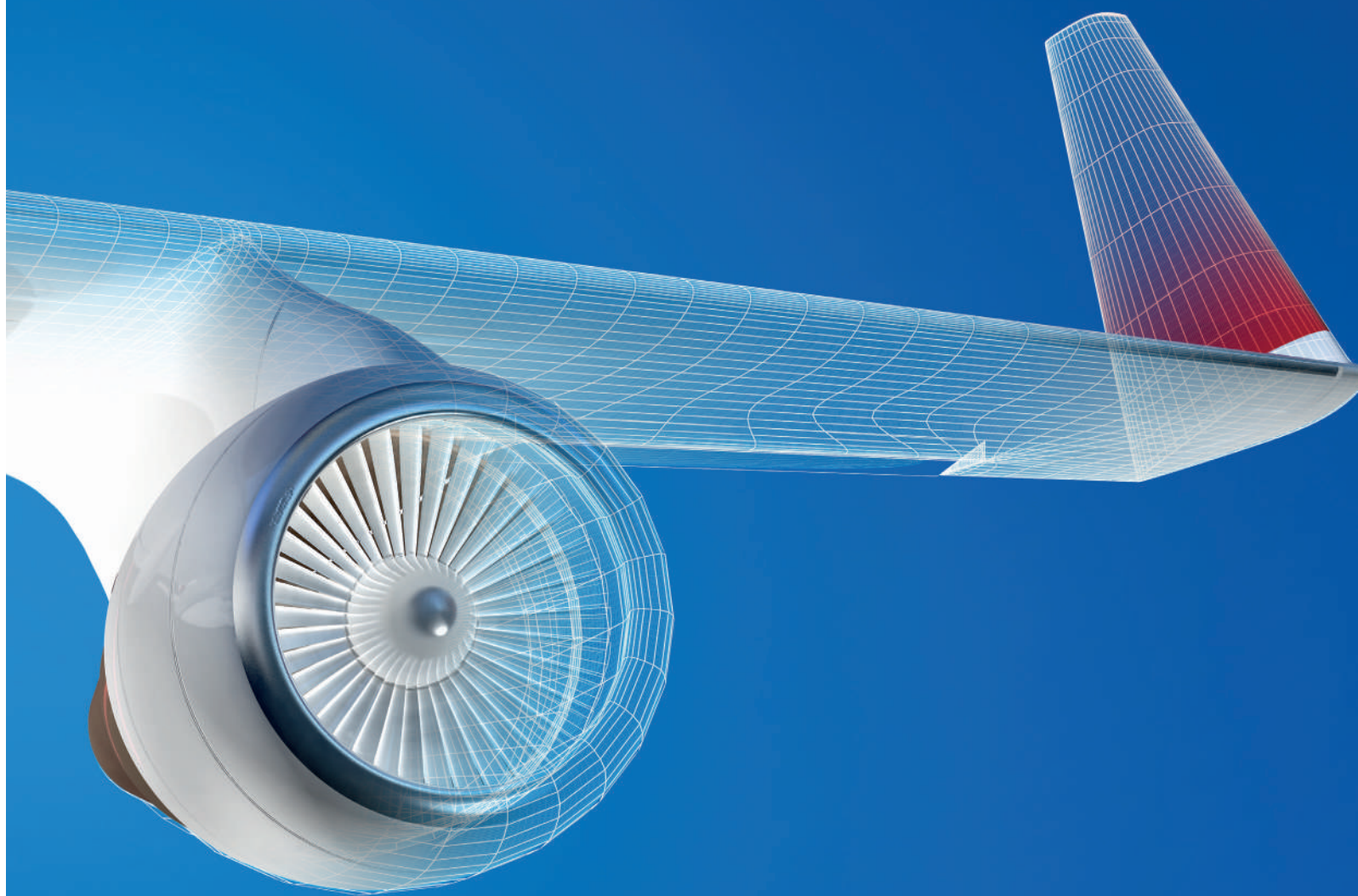


№ 8 ИЮЛЬ 2023
ISSN 2707-6989

БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
АКАДЕМИЯ АВИАЦИИ

Авиационный вестник

*The aviation
herald*



Научно-практический журнал

Главный редактор:

А. А. Шегидевич, к.т.н., ректор БГАА, Республика Беларусь.

Заместители главного редактора:

Л. И. Гречихин, д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры естественнонаучных и общепрофессиональных дисциплин БГАА, Республика Беларусь;

А. П. Кульпанович, к.т.н., доцент, начальник научно-технического отдела БГАА, Республика Беларусь;

А. А. Жукова, к.т.н., Республика Беларусь.
Технический секретарь:
Е. А. Шапорова, к.х.н., заведующий аспирантурой БГАА, Республика Беларусь.

Редколлегия**Технические науки:**

С. А. Чижик, академик НАН Беларуси, д.т.н., профессор, первый заместитель Председателя Президиума НАН Беларуси, Республика Беларусь;

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

И. В. Яцкив, д.т.н., профессор, проректор по науке и развитию TSI, Латвийская Республика;

А. Н. Медведев, д.т.н., профессор, профессор кафедры транспорта TSI, Латвийская Республика;

Ши-Хонг Джанг, д.т.н., профессор, исполнительный секретарь Китайского исследовательского объединения глубокой вытяжки металлов, профессор IMR CAS, Китайская Народная Республика;

Воонг Шин Квак, президент компании SafeUsDrone, Республика Южная Корея;

Т. Л. Алибаев, ректор ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ», заслуженный экономист Республики Татарстан, Республика Татарстан.

Юридические науки:

Б. П. Елисеев, д.ю.н., профессор, ректор МГТУ 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. З. Халилов, к.ю.н., доцент кафедры правоведения НАА, Республика Азербайджан.

Педагогические науки:

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

Т. В. Козак, д.псих.н., профессор, член-корреспондент Международной академии психологических наук, заведующий кафедрой инженерной психологии и эргономики БГУИР, Республика Беларусь;

В. Г. Стуканов, к.псих.н., д.пед.н., профессор, заведующий лабораторией проблем воспитания личности НИО, Республика Беларусь;

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

АВИАЦИОННЫЙ ВЕСТНИК

Научно-практический журнал

СОДЕРЖАНИЕ

АВИАЦИЯ В ЛИЦАХ

Леонид Беда – незабываемый герой 4

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Л. И. Гречихин, Д. Ю. Олейник. Поглощение СВЧ-излучения катион-анионной плазмой 12

Ю. А. Гурвич, А. Ю. Демко. Формирование статических и кинематических конструкций методами синтеза 22

А. М. Коваленко, А. А. Шейников, А. А. Санько, Л. А. Иваницкий. Комплексирование инерциальной и оптической навигационных систем беспилотного летательного аппарата для повышения точности позиционирования 32

А. А. Шегидевич, С. В. Василевич, Е. А. Шапорова, С. О. Стойко. Экспериментальное обоснование математических зависимостей вязкостно-температурных характеристик авиационных масел 38

А. Г. Капустин, А. В. Махов. Формализованные уравнения электромагнитных процессов явнополюсной синхронной машины в системе фазных координат 49

С. А. Коршак. Нейросетевая модель классификации режимов работы газотурбинного двигателя по материалам объективного контроля 56

Ю. А. Гурвич, К. К. Крамник, А. Ю. Демко, И. Л. Бурдин, Г. А. Сенокосов. Механико-математические методы проектирования и модернизации средств наземного обеспечения полетов 63

И. В. Рожков, А. Н. Султанова. Оценка влияния угловых флуктуаций на затраты мощности двигателя при полете беспилотного летательного аппарата в турбулентной атмосфере 71

ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Р. Л. Тюпин. Психологическая готовность к профессиональной деятельности курсантов государственной авиации 76

В. Н. Сивицкий, В. Г. Тарасюк, С. Д. Юхневич, Д. А. Максименко. Повышение качества подготовки авиационных специалистов в рамках практико-ориентированного профессионального образования ... 81

О. Г. Козлова. Исследование готовности к будущей профессиональной деятельности курсантов с разным типом профессиональной мотивации 87

ЮРИДИЧЕСКИЕ НАУКИ

И. В. Гринев. История эволюции и развития правового института обеспечения безопасности полетов в Республике Беларусь 96

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

CONTENTS

AVIATION IN PERSONS

Leonid Beda is an unforgettable hero 4

TECHNICAL SCIENCES

L. Grechikhin, D. Oleinik. Absorption of Microwave Radiation by Cation-Anion Plasma 12

Y. Gurvich, A. Dzemka. Formation of Static and Kinematic Structures by Synthetic Methods 22

A. Kovalenko, A. Sheinikov, A. Sanko, L. Ivanitski. Integration of Inertial and Optical Navigation Systems of an Unmanned Aerial Vehicle to Improve Positioning Accuracy 32

A. Shegidevich, S. Vasilevich, E. Shaporova, S. Stoiko. Experimental Substantiation of Mathematical Dependences of Viscosity and Temperature Characteristics of Aircraft Oils 38

A. Kapustin, A. Makhov. Formalized Equations of Electromagnetic Processes of an Explicitly Pole Synchronous Machine in the Phase Coordinate System 49

S. Korshak. Neural Network Model of Classification of Operating Models of a Gas Turbine Engine Based on the Materials of Objective Control 56

Y. Gurvich, K. Kramnik, A. Dzemka, I. Burdin, H. Senokosov. Mechanical and Mathematical Methods of Design and Modernization of Ground Support of Flights 63

I. Rozhkov, A. Sultanova. Evaluation of the Influence of Angular Fluctuations on Engine Power Expenses During an Unmanned Aerial Vehicle Flight in a Turbulent Atmosphere 71

PEDAGOGICAL SCIENCES

R. Tjupin. Psychological Readiness to the Professional Activity of Cadets State Aviation 76

V. Sivitsky, V. Taracyuk, S. Yuhnevich, D. Maksimenko. To the Improving the Quality of Aviation Specialists Training Within Practice-Oriented Professional Education 81

O. Kozlova. Research of Readiness for Future Professional Activity of Graduates With Different Types of Professional Motivation 87

LEGAL SCIENCES

I. Grinov. The History of Evolution and Development of the Legal Institute of Flight Safety in the Republic of Belarus 96

Колонка главного редактора



**Шегидевич
Артём Артурович**

*Ректор
Белорусской
государственной
академии авиации*

Авиационная отрасль всегда находилась на острие прогресса. Залог её динамичного развития лежит в плодотворном сотрудничестве образования, науки и реального сектора экономики.

Белорусскую государственную академию авиации можно с уверенностью назвать центром инновационной деятельности. Коллектив академии – сплоченная команда, объединенная главной целью: подготовкой высококвалифицированных авиационных специалистов и патриотов. Возращение профессионалов своего дела – ответственная и многогранная задача, весомую роль в которой играет научно-исследовательская работа.

Перед авиационным сообществом всегда ставятся сложные, но в то же время амбициозные задачи, на которые направлены силы как молодых, так и именитых ученых. В условиях современного мира как никогда важно поступательное движение навстречу новым горизонтам с целью обеспечения производственной безопасности отрасли.

На сегодняшний день одно из самых перспективных направлений развития гражданской авиации – создание конструкторской школы в рамках Союзного государства. Особенности работы в достижении поставленной цели лежат в быстрой адаптации к новым реалиям, а также синтезе новых решений в области подготовки специалистов и развития науки.

Ярким примером консолидации теоретических знаний с богатым практическим опытом стал III Международный научно-практический форум «Методы, приборы контроля качества и диагностики состояния объектов. Обучающие стенды и оборудование». Уникальное мероприятие выступило фундаментом выработки современных инженерно-технических решений, развития инновационных технологий в отечественной авиационной отрасли и укрепления системы подготовки кадров.

Белорусская государственная академия авиации продолжает уверенное движение в направлении создания отечественной авиационной научной школы. Уверен, что дальнейшее развитие науки в рамках учреждения высшего образования станет нашим общим вкладом в укреплении позиций Республики Беларусь на международной арене.

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

ЛЕОНИД БЕДА — НЕЗАБЫТЫЙ ГЕРОЙ



Леонид Игнатьевич Беда

Наша история всегда полнилась громкими и звучными именами общественных деятелей, представителей духовенства, искусства и культуры, ученых и первооткрывателей. Отдельную строку в этом списке занимают настоящие герои, которыми по праву может гордиться каждый из нас.

Один из таких героев — **Леонид Игнатьевич Беда**, командующий 26-й воздушной армией (ныне — Военно-воздушные силы и войска противовоздушной обороны Республики Беларусь). О непростом жизненном пути Леонида Игнатьевича и том, как никакие преграды не смогли сломить дух настоящего мужчины, боевого офицера, нам посчастливилось узнать из уст сына дважды Героя Советского Союза — военного летчика-снайпера, полковника в отставке **Леонида Леонидовича Беды**.

— **Леонид Леонидович, расскажите о детстве и юношестве Вашего отца.**

— Мой отец, Леонид Игнатьевич Беда, родился 16 августа 1920 года в селе Ново-Покровка Узункульского района Кустанайской области Казахской Советской Социалистической Республики (ныне — Узункульский район Костанайской области Республики Казахстан) в семье крестьян-хлеборобов, переселенных в 1893 году по царскому указу на освоение казахстанских земель.

Мой дед, Игнатий Яковлевич Беда, родился в селе Подставки Черкасской области. С 1914 по 1917 год он принимал участие в боевых действиях Первой мировой войны в составе 299-го пехотного Дубненского полка 75-й пехотной дивизии. Участвовал в обороне крепости «Иван-город», в наступлении под городом Краков, где был ранен пулей шрапнели в левую ногу. После лечения в госпитале защищал белорус-

скую землю на рубеже Огинского канала, вблизи реки Ясельда и участвовал в знаменитом Брусиловском прорыве 1916 года. В августе 1917 года он был ранен во второй раз, лечился в Челябинске. Позже дед был призван в ряды Рабоче-крестьянской Красной армии, но практически сразу комиссован по состоянию здоровья. Отцу было на кого равняться в ратном деле.

Младший брат отца также отдал всю жизнь авиации. Состояние здоровья не позволило ему летать — он стал авиационным инженером. Проходил службу в авиационных частях Закавказского, Прибалтийского и Киевского военных округов, группы советских войск в Германии. С 1959 по 1960 год служил в одной из авиационных частей аэродрома Пружаны 26-й воздушной армии.

У отца с детства проявились склонности к точным наукам: математике и физике. Любил он работать и с техникой, часто помогал старшим в ее ремонте, но тяга к точным наукам, расчетам и наставничеству оказалась сильнее. Окончив 7-летнюю школу в 1936 году, отец решил стать учителем и поступил на физико-математическое отделение Уральского учительского института.

В 30-х годах XX века молодежь повально увлеклась авиацией. По всей стране были созданы аэроклубы, в которых можно было заниматься авиамоделизмом, прыгать с парашютом и даже выполнять полеты на самолетах. Отец, как и многие его однокурсники, постигая азы педагогической мудрости, изыскивал время и для занятий в Уральском аэроклубе. Закончив в 1940 году учительский институт и получив диплом, отец начал работать в 10-й начальной школе города Уральска.

В этот период в СССР шло интенсивное развитие авиации, прослеживалась нехватка летчиков. Всесоюзный Ленинский Коммунистический Союз Молодежи, взяв шефство над Военно-воздушными силами, через военные комиссариаты стал направлять молодежь по комсомольским путевкам на обучение в летные училища. Так отец был направлен для обучения в 1-ю Чкаловскую военную авиационную школу пилотов им. К. Е. Ворошилова (впоследствии — Оренбургское высшее военное авиационное Краснознаменное училище летчиков имени И. С. Полбина), которую он закончил в августе 1942 года.

— **«Двадцать второго июня, ровно в четыре часа Киев бомбили, нам объявили, что началась война» — написал Борис Константинович Ковынев о начале кровопролитной Великой Отечественной войны. Она изменила планы каждого советского человека. Расскажите подробнее о том, как Ваш отец встретил 1941 год.**

— В августе 1940 года отец стал курсантом. К строгому распорядку дня он привык быстро: физическая зарядка в любую погоду, утренний осмотр, завтрак, занятия — конечно, все было в новинку, но он не видел ни одной преграды на пути к небу. Сидя

за партой, он постигал азы аэронавигации, метеорологии и тактики. К июню 1941 года в училище он уже освоил самолеты По-2, УТ-2, Р-5 и СБ, который был выпускным типом на то время. Все были уверены, что именно на нем им предстоит летать в боевых авиационных частях. Но жизнь сложилась иначе...

О нападении фашистской Германии отец узнал в карауле, стоя часовым на боевом посту по охране стоянки самолетов. Война!

Готовясь к выпуску, курсанты рвались на фронт, но уже во второй половине 1941 года стало ясно, что выпускники школы, летающие на СБ, на передовой не нужны. Большинство самолетов этого типа были потеряны в летних боях 1941 года, а в стране налаживался массовый выпуск штурмовиков Ил-2. Именно на них срочно нужны были обученные летчики. По этой причине фронт для отца и его сокурсников отодвинулся на период освоения штурмовика.

6 августа 1942 года, освоив Ил-2, сержанты ускоренного выпуска были направлены на Сталинградский фронт. Общий налет у отца на тот момент был 104 часа 9 минут, из них на Ил-2 — 20 часов 18 минут. Подготовка летного состава в период войны велась по алгоритму «взлет-посадка». В школе пилотов курсантам дали возможность сбросить только две бомбы-болванки и выполнить два полета на стрельбу по наземным целям: каждый снаряд был на счету. Полеты на боевое применение, в основном, отрабатывали с фотопулеметом.

— После окончания училища Леонид Игнатьевич был направлен на фронт. Расскажите про его первую боевую награду. За какой подвиг Ваш отец был удостоен ордена Красной Звезды?

— 23 августа 1942 года вместе с группой выпускников отец прибыл на Сталинградский фронт и был направлен в 505-й штурмовой авиационный полк (впоследствии — 75-й гвардейский) 226-й штурмо-

вой авиационной дивизии (впоследствии — 1-я гвардейская).

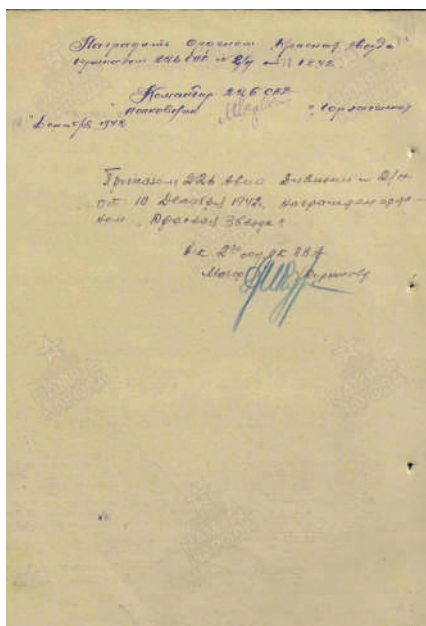
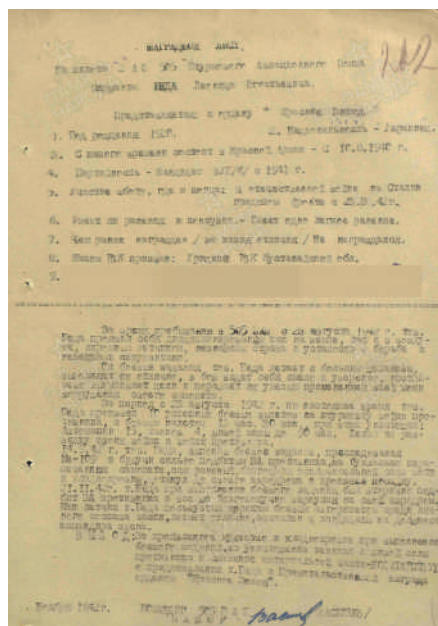
Молодые летчики приступили к выполнению боевых вылетов в районе Сталинграда, в ходе которых они наносили удары по наземным целям, вначале — в качестве ведомых в паре самолетов. С приобретением опыта, наиболее проявивших себя назначали ведущими, потом — командирами звеньев. Отца назначили ведущим пары после выполнения первых четырех боевых вылетов, а после еще шести зачислили кандидатом на должность командира звена.

Отец был представлен к награде не за какой-то конкретный подвиг или вылет, а за боевую работу в период с 23 августа по 28 ноября 1942 года. Решением командира дивизии и приказом от 10 декабря 1942 года отец был награжден орденом Красной звезды.

Одним из боевых эпизодов в Наградном листе отца указан его второй боевой вылет. 14 сентября 1942 года при атаке железнодорожного узла в составе группы Ил-2 на первом заходе вместо сброса бомб он ошибочно пустил неуправляемые реактивные снаряды. Выполнив задание и начав отход вместе с группой, отец обнаружил, что бомбы находятся на борту штурмовика. Возврат на аэродром в таком случае — трибунал. Отец принял решение вернуться к станции и полностью выполнить поставленную задачу. Немецкие зенитчики открыли шквальный огонь по одиночному самолету. Несмотря на повреждения машины, отец прицельно сбросил бомбы и только после этого взял курс домой. Внезапно огонь зениток стих. Причина стала ясна, когда к нему подошли четыре ME-109, которые взяли его в «клещи». Пилот жестом давал команду о посадке на их территории. Однако, отец был не робкого десятка, сдаваться врагу у него и в мыслях не было, он показал фашисту кукиш. Тогда немцы поочередно стали заходить в хвост Ил-2 и расстреливать его с минимальной

дистанции. Он маневрировал, не давая врагу вести прицельный огонь. Отец был ранен в левый бок, руку и голову, кровь залила левый глаз. Было перебито управление самолетом, работал только триммер руля высоты и руль направления. Впереди показалась линия фронта. Над передним краем наши зенитчики открыли яростный огонь по группе из четырех Мессершмиттов, и немцы отступили. Отец долетел до аэродрома, сажать машину пришлось на «брюхо». В штурмовике насчитали 380 пробоев от снарядов и крупнокалиберных пуль, не считая осколочных.

Отца отправили в госпиталь, где ему предоставилась возможность перенять боевой опыт от асов — те знания, о которых не говорят на учебе, а которые постигаются



Наградной лист на орден Красного Знамени и резолюция о награждении орденом Красной Звезды на сержанта Леонида Игнатьевича Беду



Леонид Игнатьевич Беда (в первом ряду в светлом кителе) с ветеранами и сыном (слева от него) на фоне штурмовика Ил-2

в схватке с врагом. Легкие раны на молодом организме зажили быстро, уже через месяц отец вернулся в полк.

— Сила духа Вашего отца впечатляет. Не могли бы Вы поделиться другими историями из боевой летописи Леонида Игнатьевича?

— Еще одним боевым эпизодом стало начало операции по освобождению Крыма — нанесение ударов по аэродромам силами 8-й воздушной армии.

Отец повел свою эскадрилью в атаку на стоянки с самолетами одного из аэродромов южнее города Джанкой. В ходе первой атаки на самолете отца была повреждена маслосистема двигателя. Двигатель остался без охлаждения и мог заклинить в любой момент. Надо было срочно выходить из боя и идти домой или хотя бы дотянуть до своей территории, но отец был ведущий группы, и от него зависел успех боя. Он не вышел из боевого порядка, а продолжил атаки на подбитом самолете. Вскоре двигатель остановился, пришлось садиться в поле. Сразу после приземления к самолету от аэродрома и ближайшей деревни помчались мотоциклисты и бронетранспортер. Отец со своим воздушным стрелком подожгли самолет, приготовились дать последний бой фашистам...

Вдруг раздались выстрелы, запылал бронетранспортер, мотоциклисты начали разворачиваться — на помощь пришла эскадрилья. Молодой летчик, выполняющий свой первый боевой вылет, посадил свой Ил-2 рядом с экипажем отца и успешно эвакуировал его на глазах у немцев.

Во время освобождения Севастополя отец и его заместитель Анатолий Яковлевич Брандыс получили задание любой ценой уничтожить корабль, вывозив-

ший военные и государственные ценности. Боевое поражение корабля было проработано до мелочей. Отрабатыв маневр, они, спикировав со стороны солнца, уничтожили корабль, оставшись практически незамеченными. За успешное проведение этой операции летчики были удостоены орденов Красного Знамени.

За годы Великой Отечественной войны отец совершил 214 боевых вылетов, последними из которых стали вылеты при взятии городов-крепостей Кёнигсберг и Пиллау. Он был не только профессионалом летного дела, но и отличным тактиком: сам разрабатывал тактические приемы поиска и поражения наземных целей, проявлял смекалку, не терпел шаблона в действиях летчиков.

— Героизм воинов-освободителей всегда поощрялся со стороны руководства страны. Не могли бы Вы рассказать нам, каких наград был удостоен Леонид Игнатьевич?

— Благодаря тактической грамотности, успешно выполняемым боевым заданиям при минимальных потерях среди штурмовиков, фамилия отца гремела по всему фронту. Он был действительно легендарным ведущим. В годы войны и послевоенного времени отец, кроме двух медалей «Золотая звезда» Героя Советского Союза, был награжден орденом Красной Звезды, орденом Александра Невского, четырьмя орденами Красного Знамени, орденом Отечественной войны I-й степени, орденом Ленина, медалями «За боевые заслуги», «За оборону Сталинграда», «За победу над Германией в Великой Отечественной войне 1941—1945 гг.», «За взятие Кёнигсберга».

— Как сложилась жизнь Вашего отца после окончания Великой Отечественной войны?

— После окончания войны началась демобилизация. В то же время Великая Отечественная война воспитала большую плеяду молодых и талантливых командиров, в том числе и в авиации. Многие из них умело воевали, но не имели серьезного военного образования. При сокращении армии руководство страны приняло решение оставить на службе наиболее проявивших себя на фронте офицеров, направив их на обучение.

Вначале отец был направлен на курсы при Высшей офицерской лётно-тактической школе в городе Липецке, а затем поступил на командный факультет Краснознамённой Военно-воздушной академии Вооружённых Сил СССР (ныне — Военно-воздушная академия им. Ю.А.Гагарина). Именно в период обучения отец встретил свою будущую жену, мою мать, Клару Андреевну, с которой прожил всю оставшуюся жизнь. После окончания академии в 1950 году он



Дважды Герой Советского Союза Леонид Игнатьевич Беда
в звании майора, 1946 год

продолжил службу в должности командира полка и заместителя командира дивизии по летной подготовке в Туркестанском военном округе. В 1955 году отец был направлен на обучение в Высшую военную академию им. К. Е. Ворошилова (ныне — Военная академия Генерального штаба Вооруженных Сил Российской Федерации). После ее окончания в 1957 году он проходил службу в должности командира дивизии в Туркестанском военном округе и Северной группе войск.

В 1963 году отец был переведен в город Лиду на должность командира 1-й гвардейской истребительно-бомбардировочной авиационной Сталинградской ордена Ленина дважды Краснознаменной орденов Суворова и Кутузова дивизии, в составе которой он воевал. В 1966 году отца перевели в город Минск на должность заместителя командующего 26-й воздушной армией, которую он возглавил в 1972 году. В 1971 году отец был удостоен почетного звания «Заслуженный военный летчик СССР».

Несмотря на огромную занятость по службе, отец находил время и для государственной общественной работы: его избрали членом Центрального Комитета Коммунистической партии Беларуси, а также депутатом 5-го и 9-го созывов Верховного Совета Белорусской Советской Социалистической Республики. Он часто и с большим удовольствием встречался с молодежью, делился опытом.

До последнего дня жизни он был действующим летчиком. Например, за 1968 — 1969 годы в его летной книжке указано более 140 часов налета на самолетах Су-7Б и МиГ-17. В последние годы своей жизни он успешно освоил Ил-14 и Ан-26.

Путь отца от курсанта до генерал-лейтенанта авиации был не прост: военной службе он посвятил 36 лет своей жизни. Стоит отметить, что он пользовался огромным авторитетом среди сослуживцев. Причины успеха крылись в его склонности к принятию решений на основе расчетов и анализа, житейской мудрости. В жизни он так и остался Педагогом с большой буквы: учил подчиненных, берег их и относился к ним с уважением, без учета рангов, званий и возраста.

Пережитые человеческие трагедии в нелегком детстве и юности, на фронте, при освоении новой реактивной и сверхзвуковой техники, службе в отдаленных гарнизонах, в условиях постоянного риска, связанного с полетами на боевых самолетах в различных условиях, наложили свой отпечаток на его характер. Он очень хорошо знал цену жизни, любил ее и окружающих его людей.

— Каким человеком был Леонид Игнатьевич вне работы? Можете ли Вы рассказать запомнившуюся Вам жизненную историю?

— Отец был азартным охотником, любил рыбалку, сбор грибов, увлекался своим автомобилем. Думаю, это был лучший отдых для него: только так он мог расслабиться. Если и появлялось свободное время, он не сидел дома на диване.

Особенно запомнилась история поездок в Брестскую крепость-герой. Три воскресенья подряд мы пытались выехать, но каждый раз то в Барановичах, то в Слониме, то в Берёзе на трассе нас останавливали военные, и мы возвращались в Минск — отца срочно вызывали на работу. Просто такая служба у руководителей высокого ранга. Полностью выходные дни были редкостью, чаще — на полдня.



Леонид Игнатьевич Беда с молодыми летчиками
на аэродроме Боровичи, 1974 год



Леонид Игнатьевич Беда после очередного тренировочного вылета, 1976 год

— Леонид Леонидович, мы знаем, что Ваш отец был заботливым отцом и любящим мужем. Можете рассказать про взаимоотношения в семье?

— Отец очень любил нас, а мы его. Конечно, имел место и воспитательный процесс, но детей никогда не наказывали рукоприкладством или ремнем. От отца я никогда не слышал нецензурной брани. Да и потом, уже будучи офицером, я много раз слышал, что он никогда не устраивал громких разносов.

Белоручек в нашей семье не было. Отец был технически грамотным человеком и требовал этого от нас. Мне особенно нравилось, когда он брал меня на охоту и рыбалку. Конечно, мое детство прошло в военных гарнизонах, на аэродромах, полигонах и стрельбищах. В то время мы дома не сидели и удерживать нас было трудно. До сих пор удивляюсь, как вспомню, что мы вытворяли: как все это обошлось только шрамами?

— 26 декабря 1976 года вся БССР содрогнулась от ужасной катастрофы. Расскажите подробнее о ней.

— Отец погиб при исполнении служебных обязанностей. В этот день группа членов правительства БССР провожала на аэродроме Пружаны улетающего на Кубу после визита в СССР Рауля Кастро. Так как аэродром военный, полная ответственность за подготовку аэродрома и обеспечение вылета лежала на моем отце. После отлета гостя планировалось перевезти членов правительства на Ан-26 в аэропорт Минск-1, где их ожидал служебный автотранспорт. Время перелета — 1 час.

Метеорологические условия допускали вылет с аэродрома Пружаны, однако аэропорт Минск-1, закрытый по причине тумана, принять этот борт не мог. Отец консультировался с метеослужбой и со своим другом и коллегой по гражданской авиации — начальником Белорусского управления гражданской авиации Дмитрием Григорьевичем Глуценко. Метеорологи обещали, что в течение часа погода улучшится. В случае правильного прогноза перемещение в Минск на самолете заняло бы не более 2–2,5 часов с момента принятия решения, в то время как на перемещение колонной автомобилей потребовалось не менее 5 часов.

Отец настаивал на перелете, как наиболее безопасном и быстром варианте, однако было принято

решение в пользу наземного транспорта. До пункта заправки в Ивацевичах отец ехал в машине Петра Мионовича Машерова. После заправки, перед посадкой в машины, к нему подошел Фёдор Анисимович Сурганов, и, взяв под локоть, пригласил в свою «Чайку», чтобы что-то обсудить.

Потеряв визуальный контакт с кортежем, машина, в которой находился отец, отстала. Это стало одной из основных причин произошедшего дорожно-транспортного происшествия, в результате которого погибли заместитель Председателя Президиума Верховного Совета СССР, Председатель Президиума Верховного Совета БССР Фёдор Анисимович Сурганов и мой отец, командующий 26-й воздушной армией, генерал-лейтенант авиации Леонид Игнатьевич Беда.

— Леонида Игнатьевича можно без преувеличения назвать героем. В одном из интервью Вы сказали: «Если уж идти по стопам отца, так идти до конца». Можете рассказать читателям о том, как сложился Ваш профессиональный путь?

— Решение идти по стопам отца я принял еще в 8–9 классе средней школы. С детства я не понаслышке знал о жизни летчиков боевой авиации. Это не только красивая форма и романтика полетов в неизведанные дали. Это тяжелый, порой безжалостный, будничный труд, который не прощает ошибок.

Отца я потерял в 1976 году, будучи курсантом 3-го курса Ейского высшего военного авиационного училища летчиков им. В. М. Комарова. После гибели отца мать очень переживала за меня. На 4-м курсе успешно освоил самолет Су-7Б и в 1977 году был направлен на должность летчика в 116-й гвардейский авиационный полк истребителей-бомбардировщиков. Сейчас этот полк базируется в Лиде.



Сын Леонида Игнатьевича Беда — военный летчик-снайпер, полковник в отставке Леонид Леонидович Беда, 1988 год, аэродром Переяславка Хабаровского края

С 1982 по 1985 год проходил службу в городе Поставы, в должности заместителя командира авиационной эскадрильи. В 1983 году мы переехали на самолет МиГ-27, а в 1985 году я поступил на командный факультет Военно-воздушной академии им. Ю. А. Гагарина, которую закончил с отличием. Продолжил службу в авиаполках 1-й воздушной армии на территории Краснознаменного Дальневосточного военного округа. В 1992 году освоил самолет Су-25, на котором летал вплоть до ухода на пенсию.

В декабре 1993 года я был переведен для дальнейшей службы в 378-й отдельный штурмовой авиационный полк, базирующийся на аэродроме Поставы. Здесь встретил свою будущую жену. В 1996 году у нас родилась дочь Александра. С 1998 года служил в Минске в службе безопасности полетов командования Военно-воздушных сил Республики Беларусь. С 2003 года — начальник управления Вооруженных Сил по регулированию деятельности государственной авиации Республики Беларусь. В июне 2009 года был уволен в запас. Символично, что и я, и отец, отдали службе в военной авиации 36 лет.

С сентября 2009 года работаю в гражданской авиации. Сначала в Транспортной инспекции Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь, где занимался вопросами расследования авиационных происшествий и их профилактикой. С 2011 года — в Департаменте по авиации. С 2015 года работал на различных должностях в небольших авиакомпаниях, в настоящее время — наземный инструктор Летной школы Крылья. Считаю престижным участие в становлении молодых пилотов. Учусь с ними аэродинамику, навигацию, ведение радиообмена. Преподаю, учительствую.

Мы готовим пилотов. Это делал мой отец, это делаю я, это делает весь наш коллектив, кстати, тоже



Леонид Игнатьевич Беда в рабочем кабинете

бывшие летчики боевой авиации. А как известно, бывших летчиков не бывает!

От автора

Память о Леониде Игнатьевиче живет и сейчас в сердцах многих людей. Родившись в Казахстане, большую часть своей жизни он прожил в Беларуси. И сегодня одна из столичных улиц носит гордое имя дважды Героя Советского Союза — улица Леонида Беды. Символично, что она находится в непосредственной близости с улицей Сурганова, будто напоминая о том трагическом холодном воскресном утре. На доме, в котором он жил, в его честь открыта мемориальная доска. В городах Лиде и Костаная (Республика Казахстан) также его именем названы улицы, а на его малой родине на центральной площади города Костаная установлен бронзовый бюст.

Леонид Игнатьевич, пожалуй, один из самых ярких примеров мужества, отваги и героизма советских людей. В годы Великой Отечественной войны его не сломили ни ранения, ни страх перед врагом. Он, как и миллионы других людей, сражался за наше мирное небо над головой. Все небывалые высоты, которых он достиг — результат тяжелого труда, профессионализма и желания работать на благо страны, на благо народа.

В Год мира и созидания, который призван сплотить наш народ и укрепить идеи мира и созидательного труда, особенно важно напоминать себе о героических поступках людей. Во многом, благодаря им мы сейчас можем радоваться, на первый взгляд, таким простым ценностям, как мир, свобода, чистое небо и уверенность в завтрашнем дне.

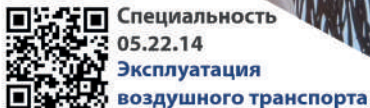
Материал подготовил
специалист пресс-службы
учреждения образования
«Белорусская государственная академия авиации»
Д. О. Шпилевский



Мемориальная доска в честь Леонида Игнатьевича Беды
в г. Минске



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»

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

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

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.

Преимущества получения образования

- ✓ 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.

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

ПОГЛОЩЕНИЕ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ КАТИОН-АНИОННОЙ ПЛАЗМОЙ

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

Олейник Дмитрий Юрьевич – инспектор управления по сертификации персонала государственного учреждения «Авиационная инспекция» Департамента по авиации Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь, Республика Беларусь
caradags@mail.ru

Dmitry Oleinik – Inspector of the Department for Certification of Personnel of the State Institution "Aviation Inspection" of the Aviation Department of the Ministry of Transport and Communications of the Republic of Belarus, Republic of Belarus
caradags@mail.ru

Аннотация: показано, что поверхность твердого тела алюминия, меди и серебра формируется трехатомными молекулами, а внутренняя структура представляет собой кристалл гранецентрированной формы и содержит только атомы, которые взаимодействуют с первым, вторым и третьим координационным слоем. Определены коэффициенты отражения и преломления электромагнитного излучения от металлической поверхности и установлено, что эффективное поглощение реализуется преимущественно в первом кластерном слое. Образующаяся плазма при воздействии лазерного излучения на металлы содержит отрицательные ионы. Поэтому из зоны воздействия лазерного излучения возникает отрицательно заряженный плазменный факел, который содержит отрицательные и положительно заряженные атомы, т. е. плазма является катион-анионной. В зоне воздействия лазерного излучения реализуется температура свыше десяти тысяч градусов, обусловленная преодолением энергии атомизации. На выходе из ресивера при атмосферном давлении температура в факеле не превышает 10 тысяч градусов и обусловлена ионизацией отрицательных ионов. При истечении плазмы из ресивера при пониженном давлении температура факела резко уменьшается. Возникает катион-анионная плазма в чистом виде. Определены давление и сверхзвуковая скорость образующейся плазмы внутри ресивера и на выходе из него. С понижением давления окружающей среды истечение плазмы из ресивера переходит в режим «разлета в вакуум», а плазма при этом является отрицательно заряженной отрицательными атомарными ионами. Такая плазма является прозрачной для радиоволн и непрозрачной в СВЧ-диапазоне. Определена мощность поглощения катион-анионной плазмой СВЧ-излучения длиной волны 3 см.

Ключевые слова: плазма, отрицательные ионы, сверхзвуковая скорость, твердое тело, лазер, ресивер.

Abstract: it is shown that the surface of aluminum, copper and silver solids is formed by triatomic molecules, while the internal structure is a face-centered cubic crystal and contains only atoms that interact with the first, second and third coordination layer. The reflection and refraction coefficients of electromagnetic radiation from the metal surface are determined and it is found that the effective absorption is realized mainly in the first cluster layer. The plasma generated as a result of laser exposure to metals contains negative ions. Therefore, from the laser exposure area, a negatively charged plasma flame containing negatively and positively charged atoms, i. e., the plasma is cationic-anionic, is formed. In the laser exposure area, it is more than ten thousand degrees, caused by overcoming the atomization energy. At the outlet of the receiver at atmospheric pressure, the temperature in the flame does not exceed ten thousand degrees and is caused by the ionization of negative ions. As plasma flows out of the receiver at reduced pressure, the flame temperature decreases sharply. A pure cation-anion plasma is produced. The pressure and supersonic speed of the generated plasma inside and at the outlet of the receiver are defined. As the ambient pressure decreases, the plasma outflow from the receiver passes into the "expansion into a vacuum" mode, and the plasma is negatively charged with negative atomic ions. Such plasma is transparent to radio waves and non-transparent in the microwave range. The cation-anion plasma absorption power of microwave radiation with a wavelength of 3 cm is determined.

Keywords: plasma, negative ions, supersonic speed, solid, laser, receiver.

Введение

Мощный лучистый теплообмен возникает при воздействии лазерного излучения на разные материалы. Какие явления при этом возникают подробно

описано в [1]. В [2, 3] детально рассмотрена роль отрицательных ионов в процессе разрушения теплозащитного покрытия и установлено, что тепловой поток состоит из трех слагаемых: конвективный теплообмен, лучистый теплооб-

мен и воздействие электронного потока, возникающего при ионизации отрицательных ионов. В каком соотношении эти тепловые потоки реализуются при лазерном воздействии предстоит выяснить.

В настоящее время в машиностроении используются лазерные технологии, где мощный лучистый теплообмен создается с помощью лазера [4–6]. В [4–6] подробно описаны конкретные лазерные технологии, реализуемые при сварке, пайке, закалке, сверлении, резке, упрочнении и даже при создании новых материалов и технологий [7]. Все эти технологии сопровождаются эффективным плазмообразованием. В этих условиях исследования плазмы были направлены на улучшение технологического процесса или на его управление. Сам процесс образования плазмы был побочным эффектом. Поэтому какое влияние оказывает кластерное строение твердого тела на поверхности и внутри твердого тела детально не исследовалось.

В процессе моделирования разрушения теплозащитного покрытия были проведены спектроскопические исследования воздействия лазерного излучения на разные материалы. Результаты опубликованы в [8, 9]. Было показано, что температура образующейся плазмы обусловлена ионизацией отрицательных ионов, а также установлено, что плазменные факелы совершают движение со скоростью, значительно превышающей скорость звука в атмосфере с нормальным давлением, и при этом возникает не периодическая структура, а образуется диск Маха на некотором удалении от поверхности материала, на который было направлено лазерное излучение. С понижением давления до 0,05 мм рт. ст. диск Маха исчезает и истечение переходит в режим «разлет в вакуум» [8].

Ранее полагали, что воздействие на материалы возникает только вследствие лучистого теплообмена. Этой энергии было достаточно, чтобы разрушить материал без эффекта взрыва. Учет конвективного и лучистого теплообмена не позволил обосновать причину возникновения разрушения со взрывом. Если рассматривать, что разрушение происходит в непрерывном режиме, то разрушение оказалось значительно больше, чем при взрывном механизме [3]. Долгое время было непонятно, почему возникает взрывной механизм разрушения.

Неясно, откуда берется дополнительная энергия, чтобы реализовался взрывной механизм разрушения.

После полного обоснования физического механизма формирования отрицательных ионов [10] процесс увеличения мощности при воздействии лазерного излучения на разные материалы обусловлен обратным потоком электронов, возникающим при ионизации отрицательных ионов у поверхности твердого тела. В этой связи необходимо было выяснить какие изменения происходят в плазменных факелах при лазерном воздействии на материалы, атомы которых обладают разной энергией сродства к электрону. При этом важно было обосновать какими свойствами обладает плазма, которая электроны не содержит, а состоит из положительных и отрицательных ионов. Такая плазма является катион-анионной. Для катион-анионной плазмы поставлена цель: обосновать условия ее возникновения и выяснить, как с такой плазмой взаимодействуют электромагнитные волны. Для обоснования цели необходимо решить следующие задачи:

1. Рассмотреть внутреннюю структуру твердого тела, когда при мощном лучистом теплообмене в плазменном факеле присутствуют преимущественно положительные и отрицательные ионы.
2. Определить коэффициент отражения и поглощения лазерного излучения при взаимодействии с металлом.

3. Установить характер взаимодействия лазерного излучения с твердым телом в процессе образования катион-анионной плазмы.

4. Выяснить процесс образования катион-анионной плазмы и ее истечение из ресивера.

5. Обосновать механизм взаимодействия электромагнитного излучения с катион-анионной плазмой.

Рассмотрим последовательно поставленные задачи.

Влияние внутренней структуры твердого тела на процесс взаимодействия с мощным лазерным излучением

Для анализа влияния внутренней структуры на процесс взаимодействия с лазерным излучением были выбраны следующие металлы: алюминий, медь и серебро, которые обладают разными энергиями сродства к электрону. Основные параметры атомов этих металлов, а также их энергии ионизации приведены в таблице 1.

Трехатомные молекулы на поверхности объединяются в поверхностные кластеры. Вид этих кластеров был получен в [6] и изображен на рисунке 1, а. Пунктиром выделены молекулы, в центре которых содержится избыточный положительный заряд. Остальные молекулы содержат в центре избыточный отрицательный заряд. На рисунке 1, б эти области изображены разным цветом: зеленым выделены положительно заряженные области, а голубым — отрицательно заряженные области.

Поверхностный кластер из трехатомных молекул похож на

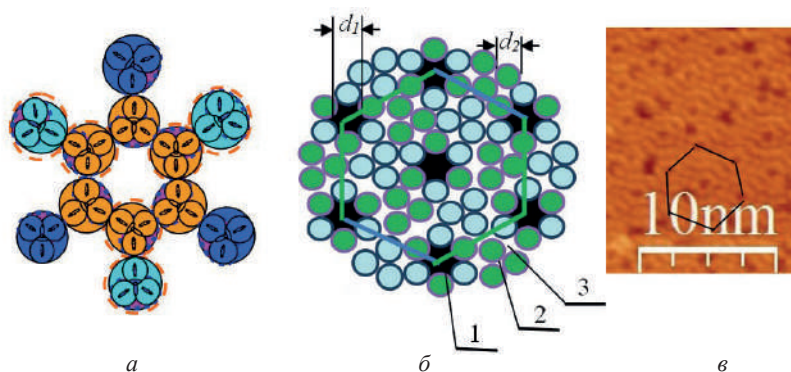


Рисунок 1 — Структура поверхности металла:

а — поверхностный кластер из трехатомных молекул; б — поверхность кристалла из трехатомных молекул (теория); в — эксперимент; 1 — внутрикластерная пустота; 2, 3 — межмолекулярная пустота [6]

Таблица 1 — Основные исходные данные для атомов выбранных металлов [15]

Материал катода	Радиус атома, нм	Радиус кластера, нм	Температура плавления, T_s , К	Температура кипения, T_b , К	Энергия атомизации, эВ/атом	Энергия ионизации, эВ	Сродство к электрону, эВ
Медь	0,128	0,384	1356 (0,213 эВ)	2816 (0,441 эВ)	3,518	7,73	1,23
Алюминий	0,143	0,429	933,24 (0,146 эВ)	2793 (0,437 эВ)	2,416	5,99	0,44; 0,33
Серебро	0,144	0,432	1233 (0,193 эВ)	2440 (0,382 эВ)	2,968	7,58	1,30

Таблица 2 — Расстояния между атомами (R) и соответствующие коэффициенты затенения (χ) для первого, второго и третьего координационного слоя в гранецентрированном кристалле [15]

Элементы	Параметры					
	R_1	R_2	R_3	$\alpha_{руд}$	χ_2	χ_3
Алюминий	2,022	2,860	4,670	0,9020	0,6590	0,0320
Медь	1,810	2,560	4,180	0,7200	0,5500	0,0210
Серебро	2,036	2,880	4,703	0,8650	0,6240	0,0285

«снежинку» со знакопередающими электрическими зарядами. На поверхности твердого тела такие «снежинки» сцепляются друг с другом и образуют электрическую знакопередающую поверхность. Когда Биннинг и Рорер в 1981 г. создали сканирующий туннельный микроскоп и была изучена поверхность кремния Si(111) [11], то теоретически рассчитанная в [12] структура поверхности кремния полностью совпала с экспериментально полученной.

Теоретически рассчитанная структура поверхности кристалла кремния, формируемого трехатомными молекулами, показана на рисунке 1, б, где темным цветом выделены отверстия, через которые под поверхность внутрь кристалла проникает лазерное излучение как в абсолютно черное тело. В качестве сравнения на рисунке 1, в показана экспериментально полученная поверхность кремния (111), состоящая из трехатомных молекул. Совпадение теории с экспериментом достаточно убедительное. Такая структура поверхности возникает для кристаллов алюминия, меди и серебра.

Внутренняя структура кристаллов исследуется с помощью рентгеноструктурного анализа, который основан на рассеянии рентгеновского излучения в про-

цессе взаимодействия с отдельными атомами. Полученные результаты показывают характер распределения атомов внутри кристалла. Однако экспериментальные данные и теоретический расчет, выполненный в [13, 14], свидетельствуют о том, что кристаллы формируются кластерами, которые в свою очередь создаются молекулами. Кристаллы алюминия, меди и серебра представляют собой гранецентрированную структуру [15], образованную трехатомными молекулами, что подтверждается экспериментально и теоретически в случае кристалла кремния, который обладает алмазной кристаллической решеткой и формируется трехатомными молекулами [12, 16].

Внутренняя структура кристалла образуется объемными кластерами [13, 14]. При их плотной упаковке грань между ними исчезает и получается, что каждый атом взаимодействует с атомами ближайшего окружения, которые создают первый координационный слой. Кроме этого, с определенной вероятностью реализуется взаимодействие со вторым и третьим координационным слоем. Следовательно, каждый атом внутри кристалла взаимодействует с большим количеством атомов, т. е. возникает коллективное взаимодействие атомов. По сравнению

с поверхностью внутри кристалла плотность атомов значительно возрастает. При таком взаимодействии следует учитывать, на каком удалении от каждого атома находятся атомы первого, второго и третьего координационного слоя, а также их взаимное затенение. Расстояние до атомов в каждом координационном слое и их затенения находятся из структуры кристалла. Результаты такого рассмотрения представлены в таблице 2.

При взаимодействии атомов с образованием молекул наибольшая энергия возникает при ковалентной связи, которая обусловлена обменом валентными электронами. В обменном взаимодействии внутри кристалла каждый валентный электрон атома частично принадлежит многим атомам. Это значит, что все валентные электроны в кристалле являются как бы свободными и не обладают спином. В кристалле алюминия максимум распределения электронов Ферми — Дирака соответствует энергии ионизации атомов. Для кристаллов меди и серебра этот максимум находится вблизи уровня Ферми и с возрастанием энергии резко падает, а энергия ионизации не совпадает с максимумом функции распределения Ферми — Дирака.

Коэффициент отражения и поглощения электромагнитных волн при взаимодействии с металлом

Скорость распространения электромагнитных волн в неоднородной среде определяется следующей формулой [17]:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}, \quad (1)$$

где ϵ_0 и μ_0 – абсолютная диэлектрическая и магнитная проницаемость вакуума;

ϵ_r и μ_r – относительная диэлектрическая и магнитная проницаемость среды.

Для вакуума $\epsilon_r = 1$ и $\mu_r = 1$, поэтому скорость распространения света в вакууме равна:

$$c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}. \quad (2)$$

В среде скорость распространения электромагнитных волн уменьшается на величину $\sqrt{\epsilon_r \mu_r}$.

Для большинства сред относительная магнитная проницаемость $\mu_r \approx 1$, и тогда справедливо:

$$\sqrt{\epsilon_r \mu_r} \approx \sqrt{\epsilon_r}, \quad (3)$$

а показатель преломления n определится как

$$n = \sqrt{\epsilon_r}. \quad (4)$$

Получается, что относительная диэлектрическая проницаемость характеризует электромагнитную плотность среды.

Если имеются две среды, по которым распространяются электромагнитные волны, то отношение скоростей распространения этих волн запишется как

$$E_{3,2} = \frac{2n_1}{n_1 + n_2} E_3, \quad (5)$$

где параметр $n_{1,2}$ является относительной электромагнитной плотностью, т. е. отношением коэффициента преломления второй среды относительно первой. Для электромагнитных волн величина $n_{1,2}$ представляет собой относительный показатель преломления. Электромагнитная волна на границе раздела двух сред при нормальном падении частично отражается и частично проходит. Рассмотрим случай, когда колебания вектора напряженности электрического поля E_3 направлено вдоль оси x , как это показано на рисунке 2.

Колебания векторов напряженности электрического поля отраженной волны $E_{3,1}$ и преломленной

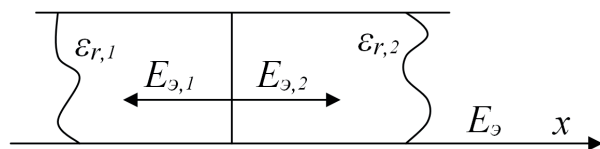


Рисунок 2 – Распространение электромагнитных волн на границе раздела двух сред [17]

волны $E_{3,2}$ также совершаются вдоль оси x . Результирующая напряженность электрических полей есть сумма напряженностей $E_{3,1}$ и $E_{3,2}$. Из закона сохранения энергии следует:

$$n_1 E_3 = -n_1 E_{3,1} + n_2 E_{3,2}, \quad (6)$$

где

$$E_3 = E_{3,1} + E_{3,2}. \quad (7)$$

Решая систему двух уравнений (6) и (7) с двумя неизвестными $E_{3,1}$ и $E_{3,2}$ получаем:

$$E_{3,1} = \frac{n_2 - n_1}{n_1 + n_2} E_3, \quad (8)$$

$$E_{3,2} = \frac{2n_1}{n_1 + n_2} E_3. \quad (9)$$

Из полученных значений электрических полей определяются коэффициенты отражения (ρ) и пропускания (σ), а именно:

$$\rho = \frac{I_1}{I} = \frac{E_{3,1}^2}{E_3^2} = \frac{(n_{1,2} - 1)^2}{(n_{1,2} + 1)^2}, \quad (10)$$

$$\sigma = \frac{I_2}{I} = \frac{E_{3,2}^2}{E_3^2} = \frac{4n_{1,2}}{(n_{1,2} + 1)^2}. \quad (11)$$

Отсюда следует важный вывод. При взаимодействии электромагнитного излучения с разреженной плазмой вектор электрической волны устанавливается перпендикулярно вектору скорости и воздействует на окружающую среду, а при взаимодействии с металлической поверхностью возникает узел. В металлическую среду электромагнитная волна не входит и полностью отражается. Это следует из (10) и (11), т. к. для металлов относительный показатель преломления стремится к бесконечности $n_{1,2} \rightarrow \infty$. Поэтому излучение лазера полностью отражается от поверхности металла, а поглощение происходит на столбообразных пустотах, через которые электромагнитное излучение, создаваемое лазером, проникает внутрь кристалла. Эти пустоты для лазерного излучения представляют собой абсолютно черное тело. На основании рисунка 1, b и $в$ вероятность поглощения лазерного излучения $\chi = 0,127$. При таком коэффициенте поглощения и высокой концентрации лазерного излучения в начальный момент воздействия происходит разрушение металла на поверхности. На фотографии, полученной в [8, 9] (рисунок 3), в области 1 четко видно слабое образование плазмы у поверхности медной пластины в начальный момент воздействия, где происходит разлет в вакуум образующейся плазмы.

По мере проникновения фронта разрушения внутрь металла образующаяся там плазма дополнительно разогревается, резко возрастает давление. В результате возникающая плазма при воздействии лазерного излучения покидает металл с огромной скоростью. По фоторазверткам были определены скорости истечения. Для меди она составила около 3,9 км/с, а для алюминия – около 8,7 км/с [9]. Реализуется сверхзвуковое истечение с большим числом Маха. В этом случае в плазменной струе образуется

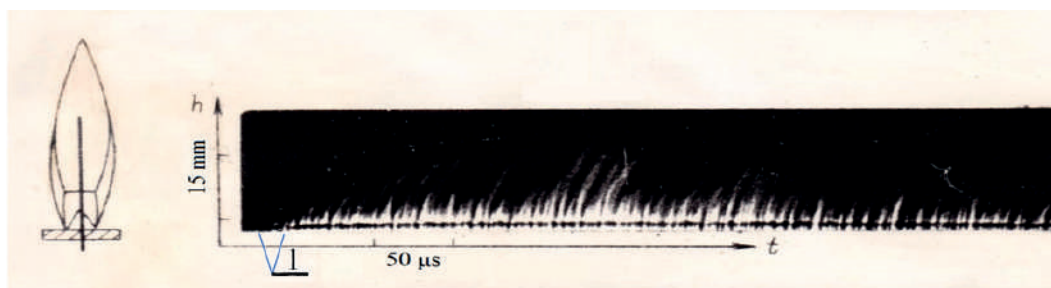


Рисунок 3 — Скоростная фоторазвертка воздействия лазерного излучения на поверхность медной пластины [8]

структура, в которой на некотором удалении от поверхности металла возникает диск Маха. Он четко виден на фотографии (см. рисунок 3). Для объяснения причин происходящего следует детально рассмотреть сам процесс взаимодействия лазерного излучения с металлом.

Взаимодействие мощного лазерного излучения с металлом и процесс образования плазмы

В общем виде коэффициент поглощения лазерного излучения при распространении в плотной среде обладает достаточно большой величиной. Амплитуды векторов $\vec{E}$ и $\vec{H}$ вдоль направления распространения резко уменьшаются. Происходит быстрое затухание волны. Скорость затухания волны определяется отношением амплитуд вектора $\vec{E}$ на отрезке Δr , т. е.

$$\frac{E(r)}{E(r + \Delta r)} = e^{-\sigma \Delta r}. \quad (12)$$

Это отношение определяет во сколько раз уменьшилась амплитуда волны при прохождении расстояния Δr .

Затухание измеряют в неперах (Нп) или в децибелах (дБ). Натуральный логарифм отношения (12) дает величину затухания, измеряемого в неперах,

$$\ln\left(\frac{E(r)}{E(r + \Delta r)}\right) = -\sigma \Delta r. \quad (13)$$

На основании (13) за единицу измерения затухания в 1 Нп принимается ослабление сигнала в e раз. Более практичной величиной измерения затухания являются децибелы. В этом случае отношение амплитуд определяется десятичным логарифмом, умноженным на 20. В абсолютных единицах получаем:

$$20 \log\left(\frac{E(r)}{E(r + \Delta r)}\right) = 20 \sigma \Delta r \log e = 8,69 \sigma \Delta r. \quad (14)$$

Отсюда следует, что 1 Нп = 8,69 дБ. Выражение (13) соответствует коэффициенту затухания, который измеряется в неперах на метр (Нп/м) или децибелах на метр (дБ/м).

Расстояние Δr , на котором происходит ослабление сигнала в e раз, является глубиной проникновения лазерного излучения в среду и носит название скинслоя. Если на расстоянии Δr ослабление составляет 1 Нп, то $\sigma \Delta r \approx 1$. Тогда

$$\Delta r = \frac{1}{\omega \sqrt{0,5 \epsilon_r \mu_r (\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha} - 1)}}, \quad (15)$$

где $\operatorname{tg} \alpha$ — отношение тока проводимости к току смещения.

Для металлов (15) упрощается и составляет [16]

$$\Delta r = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_r \sigma}}, \quad (16)$$

где f — линейная частота колебаний электромагнитной волны.

Для металлов при длине волны падающего лазерного излучения 630 нм это расстояние составляет $\Delta r \approx 77,7$ нм. Получается, что для лазерного излучения толщина скинслоя составляет большое количество кластерных слоев и при этом полностью поглощается. Основное поглощение лазерного излучения происходит в первом кластерном слое. Поэтому разрушение твердого тела происходит последовательно, слой за слоем разрушаются отдельные кластерные образования, что подтверждается экспериментальными данными (см. рисунок 3).

Если внутри кристалла возникает разрыв связи каждого атома с третьим координационным слоем, то монокристалл в виде твердоупакованного состояния [13] распадается на кластеры, содержащие атомы, которые взаимодействуют с первым и вторым координационными слоями, а свободные атомы третьего координационного слоя находятся в сферических межкластерных объемах малого размера. При температурах вблизи абсолютного нуля они пребывают в связанном состоянии, взаимодействуя со всеми шестью окружающими кластерами. Образуется однородный монокристалл типа диэлектрика. С повышением температуры, когда связь атома с атомами третьей координационной сферы полностью разрушается, в межкластерных объемах сфероидальной формы появляются атомы в свободном состоянии.

По мере дальнейшего повышения температуры разрушается связь отдельного атома с атомами второй координационной сферы. В межкластерных объемах появляются двухатомные и даже трехатомные молекулы. При полном разрушении второго координационного слоя кристалл превращается в жидкое состояние. Жидкое состояние металлов алюминия, меди и серебра вблизи температуры кипения содержит трехатомные молекулы и плоские кластеры из трехатомных молекул (см. рисунок 1, а). При температуре кипения энергия связи атома с атомами первого координационного слоя полностью разрушается и происходит образование пара над жидкостью из трехатомных молекул.

При температуре кипения образуются только трехатомные молекулы, а вблизи температуры кипения присутствуют как трехатомные молекулы, так и плоские кластеры из трехатомных молекул. Плоские кластеры между собой не взаимодействуют.

ют вследствие взаимной экранировки окружающими трех-атомными молекулами. В этих условиях с поверхности твердого тела испаряются преимущественно плоские кластеры со скоростью, численное значение которой соответствует температуре кипения. Эта ситуация экспериментально была установлена в процессе напыления индия на поверхность кремния и опубликована в [16].

Поверхностный процесс образования двухатомных и трехатомных молекул происходит интенсивно, когда энергия теплового движения не превышает энергию связи взаимодействующих частиц (атомов и двухатомных молекул). Взаимодействие трехатомных молекул приводит к образованию поверхностных кластеров в виде «снежинок». Этот вывод экспериментально установлен ранее в [12].

При очень низких температурах металлы обладают сверхпроводимостью. Температура, при которой сверхпроводимость начинает пропадать, для алюминия составляет 1,1796 К, а при 2,67 К полностью разрушается связь с третьим координационным слоем. Аналогичная ситуация имеет место и для кристаллов меди и серебра. При полном разрушении связи с третьим координационным слоем металл переходит в состояние, которое экспериментально хорошо изучено.

При температуре кипения основные кластеры полностью разрушены и испарение происходит только в виде трехатомных молекул. Как правило, трехатомные молекулы обладают самым большим сродством к электрону [10, 15]. Результаты теоретических расчетов сродства к электрону и экспериментальных данных [15] приведены в таблице 3.

Таблица 3 — Энергия связи и отрыва электрона в отрицательном ионе [15]

Атомы, молекулы	Энергия, эВ	
	связи	отрыва электрона
Al_3^-	~ 0,406	~ 1,785
Al_{2-}	2,000	2,420
$Al(^3P)$	—	0,440
$Al(^1D_2)$	—	0,330
AlO^-	5,140	3,600
AlO_2^-	~ 2,510	4,100
Cu^-	—	1,230
Ag^-	—	1,300

Примечание: знак ~ означает, что данное значение получено экстраполяцией.

При воздействии лазерного излучения на твердое тело взаимодействие происходит внутри кристалла с атомами объемных кластеров. Поэтому образующиеся плазменные факелы с поверхности твердого тела в этом случае содержат не молекулы, а отдельные атомы. При этом отдельные атомы в основном второго внешнего координационного слоя, на по-

верхности кластера пребывают в виде отрицательных ионов. Их доля на основании общего строения объемного кластера составляет отношение числа атомов на его поверхности, которые пребывают в виде отрицательных ионов к общему числу атомов в кластере и равна $3/13 \approx 0,23$. В ранних работах по изучению лазерного воздействия на твердые тела, а также в катодных факелах дугового и искрового разрядов в шестидесятые годы прошлого столетия путем применения спектрального анализа было показано, что в этом случае плазменные факелы содержат преимущественно атомы. На рисунке 4 показано, что температурное возбуждение в плазменном факеле возникает только в виде температурного возбуждения атомов, а температурное возбуждение молекул не наблюдается.

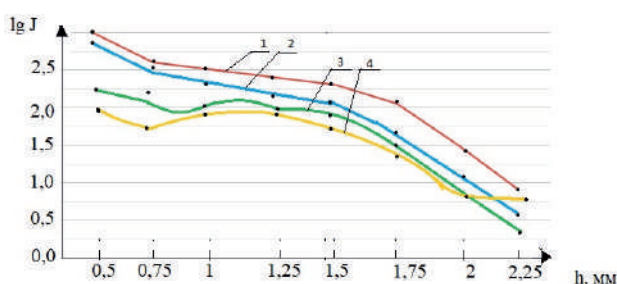


Рисунок 4 — Распределение интенсивности излучения спектральных линий меди по радиусу плазменного факела [8]:
1 — 0,4275 нм; 2 — 0,5158 нм; 3 — 0,4531 нм; 4 — 0,5105 нм

По отношению интенсивностей атомарных спектральных линий меди 510,5 нм и 515,3 нм с потенциалом возбуждения соответственно 3,817 эВ и 6,191 эВ была измерена температура на оси струи, которая при давлении $P \approx 760$ мм рт. ст. составила порядка 9500 — 10000 К, а при давлении $P = 5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. составила 8500 — 9000 К. Излучение атомарных линий осуществляется вследствие воздействия электронов, которые образуются при ионизации отрицательных ионов атомов меди. В этом случае температура электронов будет приблизительно равна 7850 К, т. е. близко к экспериментальным данным. В плазменном факеле температура несколько выше, т. к. факел дополнительно разогревается лазерным излучением.

Поскольку плазменные факелы, образующиеся при воздействии лазерного излучения, а также в дуговых и искровых разрядах содержат отрицательные ионы в большом количестве, то такие факелы должны формировать электрический ток. Для доказательства того, что такие плазменные факелы переносят электрический заряд в [9] был проведен следующий эксперимент. В асбоцементную основу вставлены на некотором удалении два электрода из меди и алюминия. Между ними был произведен мощный импульсный разряд. С электродов возникают плазменные факелы. Ток импульсного разряда протекает по поверхности и не влияет на образующиеся плазменные факелы. Общая картина истечения плазменных факелов показана на рисунке 5.

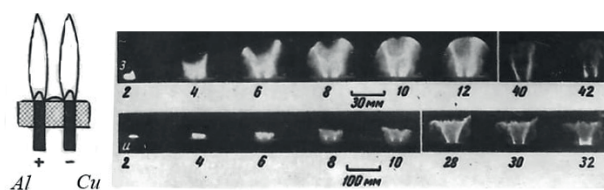


Рисунок 5 — Расположение электродов в импульсном разряде и фоторазвертка с частотой съемки 125 000 кадров в секунду [8]

На фотокадрах видно, что факелы расходятся друг относительно друга. Если они заряжены, то они создают электрический ток одинакового направления. В соответствии с законом Ампера они должны притягиваться друг к другу, а они отталкиваются. Это значит, что электромагнитное взаимодействие значительно меньше электростатического. Полученный экспериментальный результат следует рассматривать как подтверждение того, что плазменные факелы при мощном разрушении твердого тела лазерным излучением содержат свободный отрицательный заряд.

Вследствие большей концентрации отрицательных ионов в факеле, истекающем из алюминия, и меньшей массы атомов алюминия по сравнению с атомами меди плазменный факел при одной и той же силе взаимодействия отклоняется с алюминиевого электрода больше, чем с медного. Следовательно, плазменный факел, образующийся при воздействии мощного лазерного излучения на металл, содержит только атомы данного элемента. Если атомы данного элемента обладают сродством к электрону, то часть из этих атомов в факеле пребывает в виде отрицательных ионов, доля которых от общей концентрации атомов составляет не более 23 %.

По мере разрушения твердого тела при лазерном воздействии на некотором углублении образуется плазма при температуре атомизации данного твердого тела, которая препятствует дальнейшему прохождению лазерного излучения вследствие поглощения этой плазмой, что приводит к резкому возрастанию ее температуры, и, соответственно, давлению. При значительном возрастании давления в канале разрушения возникают условия истечения плазмы из ресивера.

Образование плазмы и ее истечение из ресивера

При фокусировании лазерного излучения на металлы вначале излучение проникает вглубь металла по столбообразным пустотам, и по мере разогрева кластеров твердого тела происходит последовательное превращение твердого тела в парообразное состояние, минуя жидкое состояние. При температуре атомизации происходит резкое превращение твердого тела в состояние пара, содержащего отдельные атомы. Эффективное поглощение лазерного излучения реализуется на глубину скин-слоя. Поверхностный слой атомов в кластере пребывает в виде отрицательных ионов, т. е. каждые три атома из 13 в кластере у поверхности пребывают в виде отрицательного иона. В результате внутри ресивера образу-

ется отрицательно заряженный газ из отдельных атомов. Внутренняя поверхность в ресивере вследствие образования отрицательных ионов содержит двойной электрический слой, который удерживает отрицательные ионы внутри ресивера от их разлета. Давление, которое создает одноатомный газ внутри ресивера, определяется следующим образом:

$$P_r = n_a k_b T_a, \quad (17)$$

где n_a — концентрация атомов внутри ресивера;

k_b — постоянная Больцмана;

T_a — температура атомизации.

Концентрация атомов в ресивере равна:

$$n_a = k \frac{S_r}{S_m} \cdot \frac{1}{V_r}, \quad (18)$$

где k — количество атомов в каждом кластере твердого тела;

S_r — площадь пятна облучения;

S_m — площадь сечения кластера;

V_r — внутренний объем ресивера.

На основании (18) концентрация атомов в ресивере соответственно составит: для алюминия $n_a(\text{Al}) = 2,25 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$; для меди $n_a(\text{Cu}) = 2,807 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$; для серебра $n_a(\text{Ag}) = 3,01 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$.

При температуре атомизации происходит резкое превращение атомов кристалла в состояние, когда атомы не взаимодействуют друг с другом. В этом случае температура плазмы определяется по формуле [18]

$$T_a = 0,55 \cdot E_a \cdot 11600 \text{ К}, \quad (19)$$

где E_a — энергия атомизации, эВ.

Энергия атомизации для алюминия составляет 221,1 кДж/моль, для меди — 339 кДж/моль, для серебра — 286 кДж/моль [19]. Этим энергиям атомизации соответствуют температуры: 14640 К, 22444 К и 18936 К. Температуры значительные, поэтому внутри ресивера на его стенки воздействуют мощные лучистые потоки. Это значит, что размер ресивера вследствие испарения со стенок возрастает. Такое увеличение концентрации существенно не изменяет общую концентрацию атомов в ресивере. Поэтому увеличение диаметра ресивера в размере не приводит к резкому изменению концентрации атомов, образующихся на границе разрушения твердого тела внешним лазерным излучением и внутренним лучистым потоком. Возрастание диаметра внутри ресивера приводит к образованию мини сопла Лавала, т. е. на выходе из ресивера скорость истечения плазменного факела должна несколько возрасть.

Для оценок примем диаметр пятна облучения в соответствии с рисунком 5 равным 1 мм, а глубину ресивера положим 1 мм. Количество атомов в кластере графенцентрированного кристалла равно $k = 13$. Тогда при температуре атомизации давление пара составит: для атомов алюминия $P_r = 4542 \text{ Па}$, для меди $P_r = 8692 \text{ Па}$ и для серебра $P_r = 7863 \text{ Па}$. При таких давлениях истечение пара из ресивера будет происходить со сверхзвуковой скоростью в нерасчетном режиме.

При температуре атомизации на границе твердого тела среднестатистическая скорость одноатомного газа составит [20]:

$$v_T = \sqrt{\frac{8k_b T_a}{\pi M_m}}, \quad (20)$$

где M_m — масса атома.

Конкретно для алюминия $v_T = 3480$ м/с, для меди $v_T = 2734$ м/с, для серебра $v_T = 1928$ м/с.

Полученные скорости являются сверхзвуковыми и реализуются на границе твердое тело — плазма. С такой скоростью начинается движение плазмы внутри ресивера, т. е. с поверхности, на которую воздействует лазерное излучение. Движение одноатомного газа по каналу с изменяющимся сечением происходит непрерывно, и разного рода разрывов не должно возникать. В таком движении выполняется закон непрерывности, т. е.

$$S_1 \rho_1 v_1 = S_2 \rho_2 v_2, \quad (21)$$

где S — сечение канала ресивера;

ρ — плотность плазмы;

v — скорость движения плазмы;

1 — граница твердое тело — плазма;

2 — выходное сечение ресивера.

При расширении канала ресивера изменение плотности вследствие испарения со стенок можно не учитывать. Поэтому в нашем случае можно полагать, что

$$v_2 = v_1 \frac{S_2}{S_1}. \quad (22)$$

Чтобы получить экспериментальное значение выходной скорости плазмы при воздействии лазерного излучения на алюминиевую пластину отношение площадей составит для алюминия — 2,5, для медной пластины — 1,43 и для серебряной пластины путем экстраполяции относительно энергий атомизации получаем ~1,57. Это отношение площади выходного сечения ресивера к площади сфокусированного пятна применяемого лазера.

Таким образом, при воздействии лазерного излучения на металлы возникает плазма, состоящая из катионов и анионов — катион-анионная плазма.

Взаимодействие электромагнитных волн с катион-анионной плазмой

Концентрация молекул воздуха в нормальных условиях определяется числом Лошмидта, т. е. $N_L = 2,7 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$. При уменьшении давления до $5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. концентрация молекул воздуха уменьшится до $1,78 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$. Концентрация атомов в плазменном факеле значительно выше, поэтому при истечении «разлета в вакуум» плазменная струя будет расширяться до тех пор, пока концентрация атомов внутри плазменного факела не достигнет концентрации молекул окружающей среды, т. е. расширение плазменного факела происходит последовательно внутри ресивера и при «разлете в вакуум». Расширение происходит почти мгновенно, поэтому такой процесс следует рассматривать как адиабатический. В этом случае температура плазменного факела уменьшится до величины

$$T = \frac{T_a}{(\delta \cdot \Delta V)^{\gamma-1}}, \quad (23)$$

где δ — расширение факела внутри ресивера;

ΔV — относительное расширение факела по выходе из ресивера;

γ — отношение теплоемкостей, которое для одноатомного газа равно 5/3.

Конкретные оценки, выполненные по (23), соответственно равны: при воздействии на алюминий $T_{Al} = 1465$ К, на медь $T_{Cu} = 2770$ К и на серебро $T_{Ag} = 2128$ К. При таких температурах ионизация отрицательных ионов не возникает.

Мощность падающей электромагнитной волны определяется вектором Пойнтинга:

$$\vec{P} = [\vec{E} \cdot \vec{H}]. \quad (24)$$

При этом напряженность электрического и магнитного поля связаны соотношением, отражающим закон Ома применительно к распространению электромагнитных волн [17],

$$\sqrt{\epsilon_r \epsilon_0} E = \sqrt{\mu_r \mu_0} H. \quad (25)$$

В электромагнитной волне векторы напряженностей электрического и магнитного полей взаимно перпендикулярны. По отношению к распространению волны оба поля также перпендикулярны. Применительно к воздействию на плазму на основании (24) и (25) вектор Пойнтинга принимает вид

$$P = \sqrt{\frac{\epsilon_r \epsilon_0}{\mu_r \mu_0}} E^2, \quad (26)$$

где ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость среды;

$\epsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ — диэлектрическая проницаемость вакуума;

μ_r — относительная магнитная проницаемость среды;

$\mu_0 \approx 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$ — магнитная проницаемость вакуума.

Относительную магнитную проницаемость при значительной концентрации свободных электронов можно положить равной как для металлов, а относительная диэлектрическая проницаемость с учетом ориентационной поляризации определяется по формуле [17]

$$\epsilon_r \approx 1 + \frac{n_a p_s^2}{3\epsilon_0 k_b T}, \quad (27)$$

где n_a — концентрация атомов алюминия, меди или серебра;

p_s — встроенный дипольный электрический момент атома алюминия, меди или серебра.

Так как общая концентрация достаточно мала, то относительная диэлектрическая проницаемость существенно не отличается от единицы.

Если умножить вектор Пойнтинга на сечение ΔS , по которому распространяется электромагнитная волна, то получим мощность падающей электромагнитной волны

$$W = P \cdot \Delta S, \quad (28)$$

где $\Delta S = l^2$ — общая площадь поперечного сечения.

Тогда на основании (25) — (27) получаем значение эффективной напряженности электрического поля волны

$$E_{эфф} = \sqrt{\frac{W}{\Delta S}} \cdot \sqrt{\frac{\mu_r \mu_0}{\epsilon_r \epsilon_0}} \approx 122 \sqrt{\frac{W}{\Delta S}}. \quad (29)$$

Если напряженность электрического поля волны $E_{\text{эфф}}$ умножить на диаметр отрицательного иона $2r_a$, то реализуется потенциал, который уменьшит энергию связи электрона с атомом, т. е. сродство к электрону. Этот процесс на основании закона Максвелла – Больцмана можно представить в виде [21]

$$n_e = n_a \cdot \exp \left[-\frac{EA}{k_b T} \cdot \left(1 - \frac{e^2 (2E_{\text{эфф}} r_a)^2}{(EA)^2} \right) \right], \quad (30)$$

где n_a – концентрация отрицательных ионов в факеле; EA – энергия сродства атома к электрону.

Ионизация отрицательного иона атома происходит за счет энергии электромагнитной волны, падающей на плазменный факел. Потеря энергии составит

$$\Delta W = n_e \cdot EA \cdot \Delta V, \quad (31)$$

где $\Delta V = \Delta/\pi\sigma^2 d^2/4$ (для алюминия).

Высота однородной части плазменного факела согласно рисунку 5 – не более 1 см. Тогда ΔV составляет приблизительно 10^{-7} м^3 , а поглощенная энергия составляет $\sim 1,71 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}$. Такая энергия должна выделяться в процессе прохождения электромагнитной волной зоны плазменного факела. Время прохождения волной плазменного факела составляет $\Delta t = \delta \cdot d/c$. При воздействии на алюминий $\Delta t = 4,21 \cdot 10^{-11} \text{ с}$, при воздействии на медь $\Delta t = 5,26 \cdot 10^{-11} \text{ с}$ и при воздействии на серебро $\Delta t = 5,64 \cdot 10^{-11} \text{ с}$.

На основании этих данных полное поглощение катион-анионной плазмой СВЧ-излучения с длиной волны 3 см при воздействии лазерного излучения на алюминий составляет до 183 кВт. При воздействии на медь полное поглощение достигнет 71 кВт, а при воздействии на серебряную пластину – только 10 кВт. Очевидно, что самая высокая поглощательная способность катион-анионной плазмы наблюдается, когда такая плазма возникает вследствие воздействия лазерного излучения на алюминиевую пластину.

Заключение

На основании проведенных исследований воздействия лазерного излучения на металлы установлено:

1. Поверхность твердого тела алюминия, меди и серебра формируется трехатомными молекулами, а внутренняя структура представляет собой кристалл, содержащий только атомы, которые взаимодействуют с первым, вторым и третьим координационным слоем.

2. Определены коэффициенты отражения и преломления лазерного излучения при воздействии на металлическую поверхность и установлено, что эффективное поглощение реализуется преимущественно в первом кластерном слое.

3. Образующаяся плазма содержит отрицательные ионы. Поэтому из зоны воздействия лазерного излучения истекает отрицательно заряженный плазменный факел, в котором содержатся только атомы.

4. Установлена температура плазмы, возникающая в зоне воздействия лазерного излучения, которая составляет десятки тысяч градусов. Определены давление и скорость движения плазмы внутри ресивера.

5. При внешнем нормальном давлении плазменный факел движется без существенного расширения с образованием диска Маха. В этом случае лазерное излучение дополнительно ионизирует отрицательные ионы и в факеле возникают свободные электроны с достаточно высокой температурой.

6. При пониженном давлении происходит истечение в виде «разлет в вакуум». Резкое падение плотности плазмы и соответственно температуры не приводит к эффективной ионизации отрицательных ионов, и плазма не содержит свободные электроны, а состоит из положительно заряженных и отрицательно заряженных ионов. Возникает особая плазма – катион-анионная, которая является прозрачной для широкого диапазона радиоволн.

7. Катион-анионная плазма обладает существенным поглощением для СВЧ-диапазона длин волн. Наибольшее поглощение возникает, когда лазерное излучение воздействует на металлическую пластину алюминия, атомы которого обладают наименьшим сродством к электрону, а наименьшее поглощение такой плазмой реализуется при воздействии лазерного излучения на серебряную пластину, атомы которой обладают сравнительно большим значением сродства к электрону.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Действие лазерного излучения большой мощности на металлы / С. И. Анисимов [и др.]. – М.: Наука, 1970. – 272 с.
2. Gretchikhin, L. I. Explosion of the boundary layer when spacecraft enter the dense layers of the earth's atmosphere / L. I. Gretchikhin // Military Technical Courier Scientific. Periodical of the Ministry of Defence of the Republic of Serbia. – 2020. – V. 68, № 4. – P. 804–822.
3. Gretchikhin, L. I. Positive and negative role of negative ions in cosmic exploration / L. I. Gretchikhin // Military Technical Courier Scientific. Periodical of the Ministry of Defence of the Republic of Serbia. – 2021. – V. 69, № 3. – P. 607–637.
4. Лазерное упрочнение металлов. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / под ред. В. Я. Панченко. – М.: Физматлит, 2009. – 469 с.
5. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов / А. Г. Григорьянц, И. Р. Шиганов, А. И. Мисуров. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 664 с.
6. Хоранжевский, Е. В. Физика лазеров, лазерные технологии и методы математического моделирования лазерного воздействия на вещество / Е. В. Хоранжевский, М. Д. Кривилев. – Ижевск: Изд-во Удмуртский университет, 2011. – 187 с.
7. Исследование воздействия высокоэнергетического излучения на вещество с целью создания новых материалов и технологий / В. К. Гончаров [и др.] // Вестник БГУ. Серия 1. Физика, Математика, Информатика. – 2010. – № 1. – С. 3–10.
8. Гречихин, Л. И. Разделение электрических зарядов на поверхности твердого тела: дис. на соиск. учен. степени д-ра физ.-матем. наук: 01.04.07. / Л. И. Гречихин. – Минск: МВИЗРУ, 1974. – 222 с.
9. Гречихин, Л. И. Об аналогии физических процессов, протекающих в импульсном разряде и при воздействии концентрированного лазерного излучения / Л. И. Гречихин, Л. Я. Минько // Журнал технической физики. – 1967. – Т. 37. – С. 117.

10. Gretchikhin, L. I. Negative ions of atoms, diatomic and triatomic molecules / L. I. Gretchikhin, V. M. Komarovskaya // Military Technical Courier Scientific. Periodical of the Ministry of Defence of the Republic of Serbia. – 2016. – V. 64, № 2. – P. 447–464.
11. Binnig, G. Surface studies by scanning tunneling microscopy / G. Binnig, H. Rohrer // Phys. Rev. Lett. – 1982. – Vol. 49, № 1. – P. 57–61.
12. Кластерная структура кремния и конструкция его поверхности / Л. И. Гречихин [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2015. – № 9. – С. 9–16.
13. Гречихин, Л. И. Физика наночастиц и нанотехнологий. Общие основы, механические, тепловые и эмиссионные свойства / Л. И. Гречихин. – Минск : Технопринт, 2004. – 399 с.
14. Гречихин, Л. И. Наночастицы и нанотехнологии / Л. И. Гречихин. – Минск : Право и экономика, 2008. – 406 с.
15. Физические величины: справочник / под ред. И. С. Григорьева, Е. Д. Мейлихова. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
16. Гречихин, Л. И. Исследование поверхностного слоя кремния с напылением индия / Л. И. Гречихин, Ю. Шмермбекк. – Берлин : Lambert. Academic Publishing, 2015. – 80 с.
17. Гречихин, Л. И. Основы радиосвязи / Л. И. Гречихин. – Минск : Национальная библиотека Беларуси, 2016. – 377 с.
18. Гречихин, Л. И. Среднее значение энергии электронов, выбитых из атомов при ионизации электронным ударом / Л. И. Гречихин, В. В. Кудряшов // Известия Вузов «Физика». – 1970. – № 9. – С. 158–160.
19. Глинка, Н. Л. Общая химия : учеб. пособие для вузов / Н. Л. Глинка. – Л. : Химия, 1983. – 704 с.
20. Сивухин, Д. В. Общий курс физики. Термодинамика и молекулярная физика / Д. В. Сивухин. – М. : Наука, 1979. – 551 с.
21. Гречихин, Л. И. Формирование р- и n-проводимости отрицательными ионами // Л. И. Гречихин // Авиационный вестник. – 2022. – № 6. – С. 8–16.

REFERENCES

1. Effects of high-power laser radiation on metals / S. I. Anisimov [et al.]. – Moscow: 1970. – 272 p.
2. Gretchikhin, L. I. Explosion of the boundary layer when spacecraft enter the dense layers of the earth's atmosphere / L. I. Gretchikhin // Military Technical Courier Scientific. Periodical of the Ministry of Defence of the Republic of Serbia. – 2020. – V. 68, № 4. – P. 804–822.
3. Gretchikhin, L. I. Positive and negative role of negative ions in cosmic exploration / L. I. Gretchikhin // Military Technical Courier Scientific. Periodical of the Ministry of Defence of the Republic of Serbia. – 2021. – V. 69, № 3. – P. 607–637.
4. Laser hardening of metals. Laser technologies for processing materials: current problems of fundamental research and applied developments / Edited by V. Y. Panchenko. – Moscow: Fizmatlit, 2009. – 469 p.
5. Grigoryants, A. G. Technological processes of laser processing: Textbook for universities. / A. G. Grigoryants, I. R. Shiganov, A. I. Misyurov. – Moscow: Publishing house of the Bauman Moscow State Technical University, 2006. – 664 p.
6. Khoranzhevsky, E. V. Laser physics, laser technology and methods of mathematical modeling of laser impact on matter / E. V. Khoranzhevsky, M. D. Krivilev. – Izhevsk: Publishing House "Udmurt University", 2011. – 187 p.
7. Investigation of high-energy radiation impact on matter with the purpose of creating new materials and technologies. / V. K. Goncharov [et al.] // Vestnik BSU. Series 1, Physics, Mathematics, Informatics. – 2010. – No. 1. – P. 3–10.
8. Gretchikhin, L. I. Division of electric charges on the surface of a solid body. Doctoral thesis in Physics and Mathematics: 01.04.07. / L. I. Gretchikhin. – Minsk : MVIZRU, 1974. – 222 p.
9. Gretchikhin, L. I. On the analogy of physical processes occurring in a pulsed discharge and under the action of concentrated laser radiation / L. I. Gretchikhin, L. Y. Minko // Technical Physics. – 1967. – Vol. 37. – P. 117.
10. Gretchikhin, L. I. Negative ions of atoms, diatomic and triatomic molecules / L. I. Gretchikhin, V. M. Komarovskaya // Military Technical Courier Scientific. Periodical of the Ministry of Defence of the Republic of Serbia. – 2016. – V. 64, № 2. – P. 447–464.
11. Binnig, G. Surface studies by scanning tunneling microscopy / G. Binnig, H. Rohrer // Phys. Rev. Lett. – 1982. – Vol. 49, № 1. – P. 57–61.
12. Cluster structure of silicon and structure of its surface / L. I. Gretchikhin [et al.] // Strengthening technologies and coatings. – 2015. – No. 9. – P. 9–16.
13. Gretchikhin, L. I. Physics of nanoparticles and nanotechnologies. General foundations, mechanical, thermal and emission properties / L. I. Gretchikhin. – Minsk: Tekhnoprint, 2004. – 399 p.
14. Gretchikhin, L. I. Nanoparticles and nanotechnologies / L. I. Gretchikhin. – Minsk: Law and Economics, 2008. – 406 p.
15. Physical values: reference book / edited by I. S. Grigoriev, E. D. Meilikhov. – M.: Energoatomizdat, 1991. – 1232 p.
16. Gretchikhin, L. I. Study of the surface layer of silicon with indium sputtering / L. I. Gretchikhin, Y. Shmermbekk. – Berlin: Lambert. Academic Publishing, 2015. – 80 p.
17. Gretchikhin, L. I. Basics of radio communication / L. I. Gretchikhin. – Minsk: National Library of Belarus, 2016. – 377 p.
18. Gretchikhin, L. I., Kudryashov V. V. Average value of energy of electrons knocked out of atoms during ionization by electron impact / Izvestia Vuzov. Fizika, 1970, No. 9. – P. 158–160.
19. Glinka N. L. General chemistry. Textbook for universities. – Leningrad: Chemistry, 1983. – 704 p
20. Sivukhin D. V., General Physics. Thermodynamics and Molecular Physics. – Moscow: Nauka, Main Editorial Board of Physical and Mathematical Literature. 1979. – 551 p.
21. Gretchikhin, L. I. 2022. Formation of p-, n-conductivity by negative ions. / Aviation Herald. № 6. – P. 8–16.

*Статья поступила в редакцию
06.02.2023*

ФОРМИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И КИНЕМАТИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДАМИ СИНТЕЗА

Гурвич Юрий Абрамович – кандидат технических наук, доцент кафедры естественнонаучных и общепрофессиональных дисциплин учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
gurvichyuribgaa@gmail.com

Yuri Gurvich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Natural Science and General Professional Disciplines of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
gurvichyuribgaa@gmail.com

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

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

Аннотация: описаны алгоритмы формирования методами многокритериального синтеза составных конструкций, задач кинематики сложного движения точки. Применение в учебном процессе методов многокритериального синтеза статики составных конструкций, кинематики сложного движения точки способствует формированию у студентов навыков многокритериального мышления, сокращению разрыва между современными методами проектирования машин в виде расчетно-методических многокритериальных аппаратов и знаниями обучающихся по теоретической механике.

Ключевые слова: многокритериальный синтез составных конструкций, кинематики сложного движения точки.

Abstract: algorithms for the formation by methods of multi-criteria synthesis of composite constructions, problems of kinematics of complex motion of a point are described. The use in the educational process of methods of multi-criteria synthesis of statics of composite constructions, kinematics of complex movement of the point contributes to: the formation of students' skills of multi-criteria thinking, reducing the gap between modern methods of designing machines in the form of computational and methodological multi-criteria devices and the knowledge of students in theoretical mechanics.

Keywords: multi-criteria synthesis of composite constructions, kinematics of complex motion of the point.

Введение

Методы многокритериальной идентификации и выбора, используемые в расчетно-методических многокритериальных аппаратах (РММА), курсе «Теоретическая механика», разделах статика составных конструкций (ССК) и кинематика сложного движения точки (КСДТ) описаны в [1 – 10].

Чтобы сократить разрыв между современными методами проектирования машин и их узлов в виде РММА и знаниями, получаемыми студентами в вузах, необходимо уже сейчас на лекциях и на практических занятиях реализовывать совокупность шести задач ССК и пяти задач КСДТ [10]:

- первые две задачи ССК и КСДТ являются классическими задачами анализа, которые уже давно подробно описаны во всех учебниках по теоретической механике;

- задачи 3 – 5 ССК и 3 – 4 КСДТ этих двух списков являются новыми и были впервые рассмотрены в [10].

Что касается последнего пункта списка задач ССК и КСДТ, то в огромном количестве литературы по теоретической механике, в том числе в трудах классиков механики [11 – 19] отсутствует описание использования методов многокритериального синтеза. И это

несмотря на то, что вся техника уже очень давно собирается методами синтеза: из простых элементов и конструктивных единиц формируются сложные конструкции, например, автомобили, самолеты, океанские лайнеры, строительные конструкции.

В данной статье, по сравнению с первыми работами по применению синтеза в статике и кинематике [20, 21], рассмотрены новые концепции и подходы использования методов синтеза применительно к многоэлементным статически определимым составным конструкциям и задачам КСДТ. Это позволит устранить пробел, существующий в литературе по теоретической механике, связанный с вопросами постановки и применения методов синтеза.

Была поставлена цель разработать и применить методы многокритериального синтеза в решениях различных по сложности задач: в одно- и многоэлементных статически определимых составных конструкциях; кинематики сложного движения точки.

Обоснование цели состоит из двух частей, которые реализуются путем последовательного рассмотрения:

- многокритериальный синтез задач ССК;
- многокритериальный синтез задач КСДТ.

Многокритериальный синтез задач статики составных конструкций

Постановка и алгоритм решения задач многокритериального синтеза одно- и многоэлементных статически определимых составных конструкций

В статье используются схемы, к которым приложена плоская произвольная система сил. На это указывают расположенные под углом, действующие на балки силы.

Алгоритм формирования методами многокритериального синтеза схем одно- и многоэлементных статически определимых составных конструкций осуществляется простыми элементами конструкций в соответствии с двумя критериями: решающим критерием CT — степенью статической определимости составных конструкций и их работоспособностью [10]:

1. Методы многокритериального синтеза различных схем составных конструкций будут применены к:

- одноэлементным схемам;
- двухэлементным схемам;
- трехэлементным схемам.

2. Многокритериальный синтез одноэлементных схем конструкций осуществляется с помощью простых элементов: трех видов опор (жесткая заделка, шарнирно-неподвижная опора, шарнирно-подвижная опора) и присоединенного к ним горизонтального стержня.

3. Многокритериальный синтез схем двухэлементных конструкций осуществляется с помощью конструктивных единиц, которые являются комбинацией из трех видов опор (жесткая заделка, шарнирно-неподвижная опора, шарнирно-подвижная опора) и присоединенного к ним горизонтального стержня с шарниром на конце. У каждой конструктивной единицы указано значение критерия CT .

4. Многокритериальный синтез трехэлементных схем осуществляется с помощью конструктивных единиц, которые являются комбинацией из трех видов опор (жесткая заделка, шарнирно-неподвижная опора, шарнирно-подвижная опора) и присоединенного к ним горизонтального стержня с одним или двумя шарнирами на его концах. У каждой конструктивной единицы указано значение критерия CT .

5. На сформированных схемах одно- и многоэлементных составных конструкций будут показаны все векторы составляющих реакций опор и шарниров для проведения проверки значений критериев CT и работоспособности конструкции по методу, описанному в [10].

Многокритериальный синтез схем одно- и многоэлементных статически определимых составных конструкций

Пример 1. Описание алгоритма формирования методами синтеза статически определимых одноэлементных схем из простых элементов конструкций (рисунок 1).

Определим структурные формулы будущих схем конструкций, используя обозначения простых элементов, показанных на рисунке 1:

$$(c + d + b); (a + d), \quad (1)$$

где буквами обозначены простые элементы конструкций.

Сформируем отличные друг от друга статически определимые схемы конструкций с помощью простых элементов, показанных на рисунке 1, по структурным формулам (1) и укажем на сформированных схемах все векторы составляющих реакций опор и шарниров (рисунок 2).

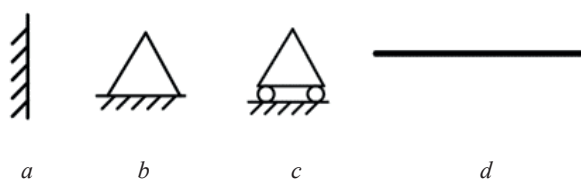


Рисунок 1 — Простые элементы одноэлементных схем

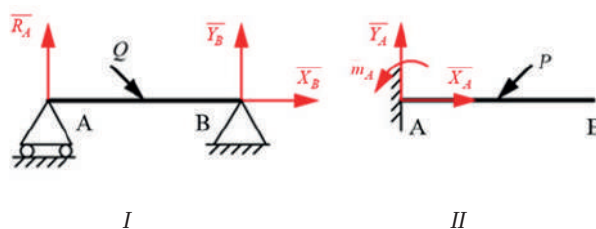


Рисунок 2 — Примеры одноэлементных схем конструкций

Проведем проверку корректности синтеза двух схем простыми элементами с помощью критериев CT и работоспособности конструкции.

Схема I.

Определим $H_I, Y_i, CT_I, i=1$:

- 1) $H_I = 3 (R_A, X_B, Y_B)$;
- 2) $\sum_1 Y_i = Y_1 = 3 (\sum X = 0, \sum Y = 0, \sum m_A = 0)$;
- 3) $CT_I = H_I - Y_1 = 3 - 3 = 0$.

Синтезированная одноэлементная конструкция I (рисунок 2) является статически определимой и работоспособной.

Схема II.

Определим $H_{II}, Y_i, CT_{II}, i=1$:

- 1) $H_{II} = 3 (X_A, Y_A, m_A)$;
- 2) $\sum_1 Y_i = Y_1 = 3 (\sum X = 0, \sum Y = 0, \sum m_A = 0)$;
- 3) $CT_{II} = H_{II} - Y_1 = 3 - 3 = 0$.

Синтезированная одноэлементная конструкция II (рисунок 2) является статически определимой и работоспособной.

Результат синтеза. Синтез двух одноэлементных конструкций с помощью простых элементов выполнен корректно, все конструкции — статически определимые и работоспособные.

Пример 2. Описание алгоритма формирования методами синтеза статически определимых двухэлементных схем из конструктивных единиц, которые являются комбинацией из трех видов опор и присоединенного к ним горизонтального стержня с шарниром на конце (рисунок 3).

Определим структурные формулы будущих схем конструкций, используя обозначения конструктивных единиц, показанных на рисунке 3:

$$(2 + 4); (3 + 1); (1 + 5), \quad (2)$$

где цифрами обозначены конструктивные единицы.

Сформируем отличные друг от друга статически определимые схемы конструкций с помощью конструктивных единиц, показанных на рисунке 3, по структурным формулам (2), а также укажем на сформированных схемах все векторы составляющих реакций опор и шарниров (рисунок 4).

Проведем проверку корректности синтеза двух схем простыми элементами с помощью критериев CT и работоспособность конструкции.

Схема I.

Определим $H_I, Y_i, CT_I, i = 2$:

- 1) $H_I = 6 (X_A, Y_A, X_B, Y_B, R_C, R_D)$;
- 2) $\sum_{i=1}^2 Y_i = Y_1 + Y_2 = 3 + 3 = 6$;
- 3) $CT_I = H_I - (Y_1 + Y_2) = 6 - (3 + 3) = 0$.

Синтезированная двухэлементная конструкция (рисунок 4, схема I) является статически определимой и работоспособной.

Схема II.

Определим $H_{II}, Y_i, CT_{II}, i = 2$:

- 1) $H_{II} = 6 (X_A, Y_A, m_A, X_B, Y_B, R_C)$;
- 2) $\sum_{i=1}^2 Y_i = Y_1 + Y_2 = 3 + 3 = 6$;
- 3) $CT_{II} = H_{II} - (Y_1 + Y_2) = 6 - (3 + 3) = 0$.

Синтезированная двухэлементная конструкция (рисунок 4, схема II) является статически определимой и работоспособной.

Схема III.

Определим $H_{III}, Y_i, CT_{III}, i = 2$:

- 1) $H_{III} = 6 (R_A, X_B, Y_B, X_C, Y_C, R_D)$;
- 2) $\sum_{i=1}^2 Y_i = Y_1 + Y_2 = 3 + 3 = 6$;
- 3) $CT_{III} = H_{III} - (Y_1 + Y_2) = 6 - (3 + 3) = 0$.

Синтезированная двухэлементная конструкция (рисунок 4, схема III) является статически определимой и работоспособной.

Результат синтеза. Синтез трех двухэлементных конструкций с помощью конструктивных единиц выполнен корректно. Все конструкции — статически определимые и работоспособные.

Пример 3. Описание алгоритма формирования методами синтеза статически определимых трехэлементных схем из конструктивных единиц (рисунок 5). Сформируем статически определимые трехэлементные схемы конструкций типа «Мост» и «Ферма».

Для этого:

1. Определим структурные формулы будущих схем конструкций, используя обозначения конструктивных единиц

$$\text{«Мост»} - (2 + 13 + 2); \text{ «Ферма»} - (2 + 9 + 2), \quad (3)$$

где цифрами обозначены конструктивные единицы (рисунок 5).

2. Сформируем отличные друг от друга статически определимые схемы конструкций с помощью конструктивных единиц, показанных на рисунке 5, по структурным формулам (3), а также укажем на сформированных схемах все векторы составляющих реакций опор и шарниров (рисунок 6).

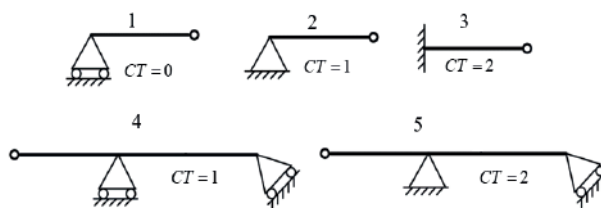


Рисунок 3 — Конструктивные единицы для синтеза двухэлементных схем

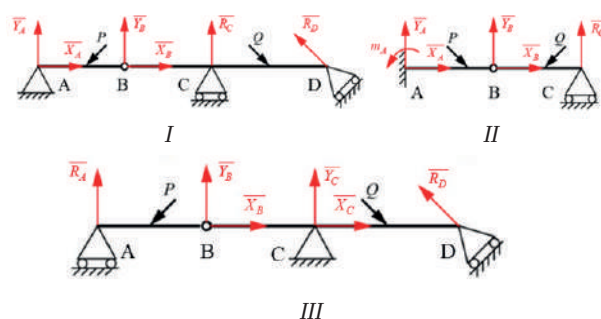


Рисунок 4 — Двухэлементные схемы

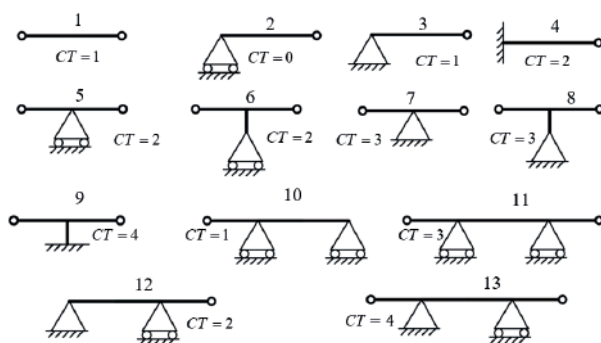


Рисунок 5 — Конструктивные единицы для синтеза трехэлементных схем

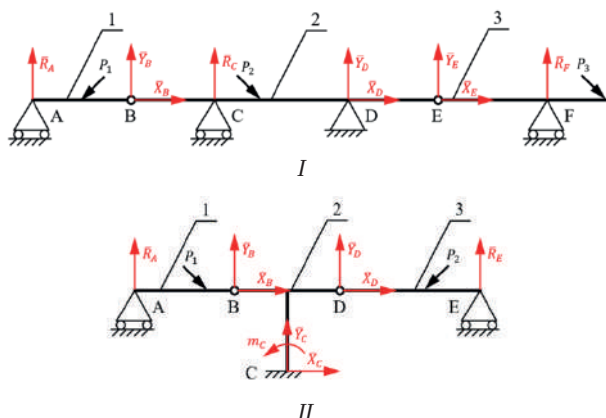


Рисунок 6 – Трехэлементные схемы:
I – «Мост», II – «Ферма»

Проведем проверку корректности синтеза двух схем простыми элементами с помощью критериев СТ и работоспособности конструкции.

Схема I – «Мост».

Определим H_I , Y_i , CT_I , $i = 3$:

$$1) H_I = 9 - (R_A, X_B, Y_B, R_C, X_D, Y_D, X_E, Y_E, R_F);$$

$$2) \sum_{i=1}^3 Y_i = Y_1 + Y_2 + Y_3 = 3 + 3 + 3 = 9;$$

$$3) CT_I = H_I - (Y_1 + Y_2 + Y_3) = 9 - (3 + 3 + 3) = 0.$$

Синтезированная трехэлементная конструкция на схеме I «Мост» (рисунок 6) является статически определимой и работоспособной.

Схема II – «Ферма».

Определим H_{II} , Y_i , CT_{II} , $i = 3$:

$$1) H_{II} = 9 - (R_A, X_B, Y_B, X_C, Y_C, m_C, X_D, Y_D, R_E);$$

$$2) \sum_{i=1}^3 Y_i = Y_1 + Y_2 + Y_3 = 3 + 3 + 3 = 9;$$

$$3) CT_{II} = H_{II} - (Y_1 + Y_2 + Y_3) = 9 - (3 + 3 + 3) = 0.$$

Синтезированная трехэлементная конструкция на схеме II «Ферма», (рисунок 6) является статически определимой и работоспособной.

Результат синтеза. Синтез трехэлементных конструкций типа «Мост» и «Ферма» с помощью конструктивных единиц выполнен корректно, все конструкции – статически определимые и работоспособные.

Пример 4. Описание алгоритма формирования методами синтеза статически определимых трехэлементных схем из конструктивных единиц (рисунок 5). Сформируем статически определимые трехэлементные схемы конструкций типа «Мост» и «Ферма». Для этого:

1. Определим структурные формулы будущих схем конструкций, используя обозначения конструктивных единиц (рисунок 5)

$$\text{«Мост»} - (10 + 5 + 3); \text{ «Ферма»} - (3 + 6 + 3), \quad (4)$$

где цифрами обозначены конструктивные единицы.

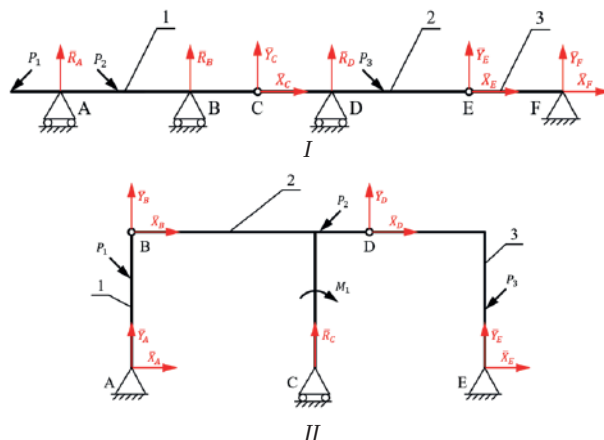


Рисунок 7 – Трехэлементные схемы:
I – «Мост», II – «Ферма»

2. Сформируем отличные друг от друга статически определимые схемы конструкций с помощью конструктивных единиц, показанных на рисунке 5, по структурным формулам (4), а также укажем на сформированных схемах все векторы составляющих реакций опор и шарниров (рисунок 7).

3. Проведем проверку корректности синтеза двух схем простыми элементами с помощью критериев СТ и работоспособности конструкции.

Схема I – «Мост».

Определим H_I , Y_i , CT_I , $i = 3$:

$$1) H_I = 9 - (R_A, R_B, X_C, Y_C, R_D, X_E, Y_E, X_F, Y_F);$$

$$2) \sum_{i=1}^3 Y_i = Y_1 + Y_2 + Y_3 = 3 + 3 + 3 = 9;$$

$$3) CT_I = H_I - (Y_1 + Y_2 + Y_3) = 9 - (3 + 3 + 3) = 0.$$

Синтезированная трехэлементная конструкция на схеме I «Мост» (рисунок 7) является статически определимой и работоспособной.

Схема II – «Ферма».

Определим H_{II} , Y_i , CT_{II} , $i = 3$:

$$1) H_{II} = 9 - (X_A, Y_A, X_B, Y_B, R_C, X_D, Y_D, X_E, Y_E);$$

$$2) \sum_{i=1}^3 Y_i = Y_1 + Y_2 + Y_3 = 3 + 3 + 3 = 9;$$

$$3) CT_{II} = H_{II} - (Y_1 + Y_2 + Y_3) = 9 - (3 + 3 + 3) = 0.$$

Синтезированная трехэлементная конструкция на схеме II «Ферма» (рисунок 7) является статически определимой и работоспособной.

Результат синтеза. Синтез трехэлементных конструкций типа «Мост» и «Ферма» с помощью конструктивных единиц выполнен корректно. Все конструкции являются статически определимыми и работоспособными.

Пример 5. Описание алгоритма формирования методами синтеза статически определимых трехэлементных схем из конструктивных единиц (рисунок 5).

Сформируем статически определимые трехэлементные схемы конструкций типа «Мост» и «Ферма». Для этого:

1. Определим структурные формулы будущих схем конструкций, используя обозначения конструктивных единиц:

$$\text{«Мост»} - (12 + 1 + 10); \text{«Ферма»} - (4 + 1 + 3), \quad (5)$$

где цифрами обозначены конструктивные единицы (рисунок 5).

2. Сформируем отличные друг от друга статически определимые схемы конструкций с помощью конструктивных единиц (рисунок 5) по структурным формулам (5), а также укажем на сформированных схемах все векторы составляющих реакций опор и шарниров (рисунок 8).

3. Проведем проверку корректности синтеза двух схем простыми элементами с помощью критериев СТ и работоспособность конструкции.

Схема I – «Мост».

Определим $H_I, Y_i, CT_I, i = 3$:

$$1) H_I = 9 - (X_A, Y_A, R_B, X_C, Y_C, X_D, Y_D, R_E, R_F);$$

$$2) \sum_{i=1}^3 Y_i = Y_1 + Y_2 + Y_3 = 3 + 3 + 3 = 9;$$

$$3) CT_I = H_I - (Y_1 + Y_2 + Y_3) = 9 - (3 + 3 + 3) = 0.$$

Синтезированная трехэлементная конструкция на схеме I «Мост», (рисунок 8) является статически определимой и работоспособной.

Схема II – «Ферма».

Определим $H_{II}, Y_i, CT_{II}, i = 3$:

$$1) H_{II} = 9 - (X_A, Y_A, m_A, X_B, Y_B, X_C, Y_C, X_D, Y_D);$$

$$2) \sum_{i=1}^3 Y_i = Y_1 + Y_2 + Y_3 = 3 + 3 + 3 = 9;$$

$$3) CT_{II} = H_{II} - (Y_1 + Y_2 + Y_3) = 9 - (3 + 3 + 3) = 0.$$

Синтезированная трехэлементная конструкция на схеме II «Ферма» (рисунок 8), является статически определимой и работоспособной.

Результат синтеза. Синтез трехэлементных конструкций типа «Мост» и «Ферма» с помощью конструктивных единиц выполнен корректно, все конструкции являются статически определимыми и работоспособными.

В отличие от решений задач анализа статики, где, как правило, существует единственное решение, в задачах синтеза статики – множество решений. Поэтому при решении одной задачи синтеза можно сформировать множество задач анализа, например, сформированные с помощью простых элементов от-

личные друг от друга статически определимые схемы конструкций I, II, III (рисунки 2, 4, 6–8) можно еще и удвоить. Для этого достаточно эти схемы повернуть вокруг точки «А» на 180° по часовой стрелке вокруг оси Z правой тройки ортогональной декартовой системы осей XYZ. Новые схемы будут отличаться от схем, показанных на рисунках 2, 4, 6–8, расположением опор.

На первый взгляд может показаться, что схемы конструкций, отличающиеся расположением опор, абсолютно одинаковые, но это неверно. Приведем пример о размыве берегов рек. В России 10 рек текут с юга на север, крупнейшие из них – Енисей, Обь, Лена. У них левый берег выше правого. А у рек, текущих на юг, – Волга, Дон, Урал, Нева, наоборот, правый берег выше левого (это за счет сил инерции Кориолиса). Конструкторская документация для спроектированного моста, например, через реку Лена абсолютно не подойдет для моста через реку Волга даже при одинаковой длине мостов, придется делать новую документацию, поскольку расположение опор этих двух проектов будет отличаться.

Многокритериальный синтез задач кинематики сложного движения точки

Основные теоретические положения кинематики сложного движения точки, используемые методами многокритериального синтеза

Формулы абсолютного ускорения точки при переносном поступательном прямолинейном и поступательном криволинейном движении приведены в [10]. Если относительное движение точки – ускоренное криволинейное, а переносное движение – ускоренное вращательное, то формула абсолютного ускорения точки M приобретает вид:

$$\bar{a} = \bar{a}_r^r + \bar{a}_r^n + \bar{a}_e^r + \bar{a}_e^n + \bar{a}_k, \quad (6)$$

где $\bar{a}$ – абсолютное ускорение точки; $\bar{a}_r^r$ – относительное тангенциальное ускорение точки; $\bar{a}_r^n$ – относительное нормальное ускорение точки; $\bar{a}_e^r$ – переносное тангенциальное ускорение точки; $\bar{a}_e^n$ – переносное нормальное ускорение точки; $\bar{a}_k$ – ускорение Кориолиса.



Рисунок 8 – Трехэлементные схемы:
I – «Мост», II – «Ферма»

Векторные слагаемые абсолютного ускорения в (6) определяются из законов относительного и переносного движений. В статье рассматриваются только три вида переносного движения: поступательное прямолинейное, поступательное криволинейное и вращательное.

Определим количество и вид вариантов критерия $\bar{a}$ (абсолютное ускорение точки), которые отличаются числом и видом векторных составляющих абсолютного ускорения $\bar{a}_r^t, \bar{a}_r^n, \bar{a}_e^t, \bar{a}_e^n, \bar{a}_k$. Для этого используем (6) и простейшие законы относительно и переносного движений. Полученные варианты критерия $\bar{a}$ разбиваем на пять групп.

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

$$\bar{a} = 0, \bar{a} = \bar{a}_r^t, \bar{a} = \bar{a}_r^n, \bar{a} = \bar{a}_e^t, \bar{a} = \bar{a}_e^n.$$

Вторая группа – семь критериев, каждый состоит из сочетания двух векторных слагаемых абсолютного ускорения точки:

$$\begin{aligned} \bar{a} &= \bar{a}_r^t + \bar{a}_r^n, \bar{a} = \bar{a}_r^t + \bar{a}_e^t, \bar{a} = \bar{a}_r^t + \bar{a}_e^n, \bar{a} = \bar{a}_r^n + \bar{a}_e^n, \\ \bar{a} &= \bar{a}_r^n + \bar{a}_e^t, \bar{a} = \bar{a}_e^t + \bar{a}_e^n, \bar{a} = \bar{a}_e^n + \bar{a}_k. \end{aligned}$$

Третья группа – семь критериев, каждый состоит из сочетания трех векторных слагаемых абсолютного ускорения точки:

$$\begin{aligned} \bar{a} &= \bar{a}_r^t + \bar{a}_r^n + \bar{a}_e^t, \bar{a} = \bar{a}_r^t + \bar{a}_r^n + \bar{a}_e^n, \\ \bar{a} &= \bar{a}_r^t + \bar{a}_e^t + \bar{a}_e^n, \bar{a} = \bar{a}_r^t + \bar{a}_e^n + \bar{a}_k, \\ \bar{a} &= \bar{a}_r^n + \bar{a}_e^t + \bar{a}_e^n, \bar{a} = \bar{a}_r^n + \bar{a}_e^n + \bar{a}_k, \\ \bar{a} &= \bar{a}_e^t + \bar{a}_e^n + \bar{a}_k. \end{aligned}$$

Четвертая группа – четыре критерия, каждый состоит из сочетания четырех векторных слагаемых абсолютного ускорения точки:

$$\begin{aligned} \bar{a} &= \bar{a}_r^t + \bar{a}_r^n + \bar{a}_e^t + \bar{a}_e^n, \bar{a} = \bar{a}_r^t + \bar{a}_r^n + \bar{a}_e^n + \bar{a}_k, \\ \bar{a} &= \bar{a}_r^t + \bar{a}_e^t + \bar{a}_e^n + \bar{a}_k, \bar{a} = \bar{a}_r^n + \bar{a}_e^t + \bar{a}_e^n + \bar{a}_k. \end{aligned}$$

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

$$\bar{a} = \bar{a}_r^t + \bar{a}_r^n + \bar{a}_e^t + \bar{a}_e^n + \bar{a}_k.$$

Постановка и алгоритм решения задачи многокритериального синтеза кинематики сложного движения точки

Описание алгоритма формирования методами многокритериального синтеза схем сложного движения точки M из простых элементов конструкций переносного (e) и относительного (r) движений в соответствии с критериями – числом и видом векторных слагаемых абсолютного ускорения точки $\bar{a}$.

1. В каждой из первых четырех групп (кроме пятой) выбираем необходимые критерии абсолютного ускорения точки.

2. Схемы сложного движения точки M , соответствующие критериям – числу и виду векторных слагаемых абсолютного ускорения точки $\bar{a}$, необходимо формировать методами синтеза из двух простых элементов конструкций переносного движения (рисунок 9).

3. Затем к сформированным схемам переносного движения добавляем по одному простому элементу относительного движения (рисунок 9).

4. На сформированных схемах абсолютного движения точки M покажем все векторы, которые отображают кинематические характеристики сложного движения точки.

Пример 6. Описание алгоритма формирования методами синтеза схем сложного движения точки M из простых элементов конструкций переносного и относительного движений (рисунок 9) в соответствии с критерием первой группы – числом и видом векторных слагаемых абсолютного ускорения точки $\bar{a}$. Показать на сформированных схемах все векторы кинематических характеристик сложного движения точки, отображающих этот критерий:

$$\bar{a} = \bar{a}_e^t.$$

1. Сформируем две отличные друг от друга схемы переносного движения, соответствующие физическим и кинематическим характеристикам данного критерия:

$$(2e + 3e), (2e + 4e).$$

2. Затем к сформированным схемам переносного движения добавляются простые элементы относительного движения:

$$(2e + 3e + 3r), (2e + 4e + 2r).$$

3. На сформированных схемах в прямоугольных декартовых осях XYZ показаны векторы – $\omega_e, V_r, \bar{a}_e^t$ (рисунок 10).

Результат синтеза. Из простых элементов переносного и относительного движений точки M сформировано две схемы КСДТ, соответствующие критерию первой группы $\bar{a} = \bar{a}_e^t$.

Пример 7. Описание алгоритма формирования методами синтеза схем сложного движения точки M из простых элементов конструкций переносного и относительного движений (см. рисунок 9) в соответствии с критериями – числом и видом векторных слагаемых абсолютного ускорения точки $\bar{a}$. Показать на сформированных схемах все векторы кинематических характеристик сложного движения точки, отображающих этот критерий

$$\bar{a} = \bar{a}_r^n + \bar{a}_e^n.$$

1. Сформируем по две отличные друг от друга схемы переносного движения для данного критерия:

$$(2e + 5e), (2e + 4e).$$

Переносное движение в виде $(2e + 5e)$ можно показать на конструкции, состоящей из рамки 2, которая своими двумя горизонтальными направляющими войдет в два криволинейных эквидистантных паза, проделанных пальчиковой фрезой в корпусе 5. При движении влево-вправо от нейтрального положения рамка 2 будет совершать поступательное криволинейное движение, как люлька вращающегося колеса обозрения.

2. Затем к сформированным шести схемам переносного движения добавляем простые элементы относительного движения

$$(2e + 5e + 5r), (2e + 4e + 7r).$$

3. На сформированных схемах в прямоугольных декартовых осях XYZ показаны векторы ω_e , V_r , a_e^n , a_r^n (рисунок 11).

Результат синтеза. Из простых элементов переносного и относительного движений точки M сформировано две схемы КСДТ, соответствующие критерию второй группы $\bar{a} = a_r^n + a_e^n$.

Пример 8. Описание алгоритма формирования методами синтеза схем сложного движения точки M из простых элементов конструкций переносного и относительного движений (рисунок 1) в соответствии с тремя критериями третьей группы – числом и видом векторных слагаемых абсолютного ускорения точки $\bar{a}$.

Показать на сформированных схемах все векторы кинематических характеристик сложного движения точки, отображающие эти критерии:

$$\bar{a} = \bar{a}_e^\tau + \bar{a}_e^n + \bar{a}_k, \quad \bar{a} = \bar{a}_r^\tau + \bar{a}_e^\tau + \bar{a}_e^n.$$

1. Сформируем по две отличные друг от друга схемы переносного движения для первого и второго критериев:

$$(2e + 4e), (2e + 4e); \\ (2e + 5e), (2e + 4e).$$

2. Затем к сформированным четырем схемам переносного движения добавляем простые элементы относительного движения:

$$(2e + 4e + 4r), (2e + 4e + 7r); \\ (2e + 5e + 3r), (2e + 4e + 1r).$$

3. На сформированных схемах в прямоугольных декартовых осях XYZ показаны векторы ω_e , ε_e , V_r , a_e^n , a_k (рисунок 12).

Результат синтеза. Из простых элементов переносного и относительного движений точки M сформировано по две схемы КСДТ, отображающие критерии третьей группы:

$$\bar{a} = \bar{a}_e^\tau + \bar{a}_e^n + \bar{a}_k, \quad \bar{a} = \bar{a}_r^\tau + \bar{a}_e^\tau + \bar{a}_e^n.$$

Пример 9. Описание алгоритма формирования методами синтеза схем сложного движения точки M из простых элементов конструкций переносного и относительного движений (см. рисунок 9) в соответствии с критериями четвертой группы – числом и видом векторных слагаемых абсолютного ускорения точки $\bar{a}$. Показать на сформированных схемах все векторы кинематических характеристик сложного движения точки, отображающие эти критерии:

$$\bar{a} = \bar{a}_e^\tau + \bar{a}_e^n + \bar{a}_k, \quad \bar{a} = \bar{a}_r^\tau + \bar{a}_e^\tau + \bar{a}_e^n.$$

1. Сформируем по две отличные друг от друга схемы переносного движения для первого, второго и третьего критерия:

$$(2e + 5e), (2e + 4e); \\ (2e + 4e), (2e + 4e).$$

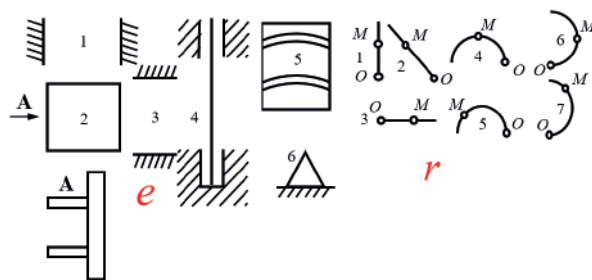


Рисунок 9 — Простые элементы (слева направо) переносного движения e — 1–6, вид A; относительного движения r — 1–7, OM

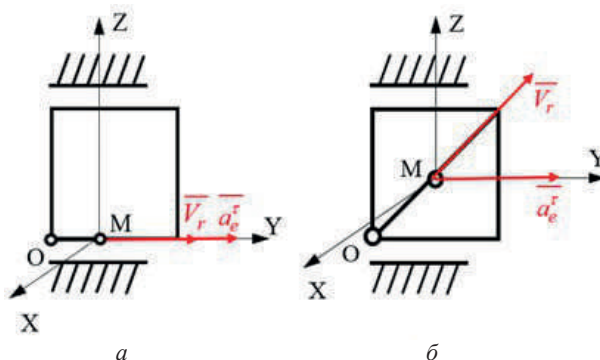


Рисунок 10 — Схемы синтеза КСДТ, построенные по критерию $\bar{a} = a_e^\tau$

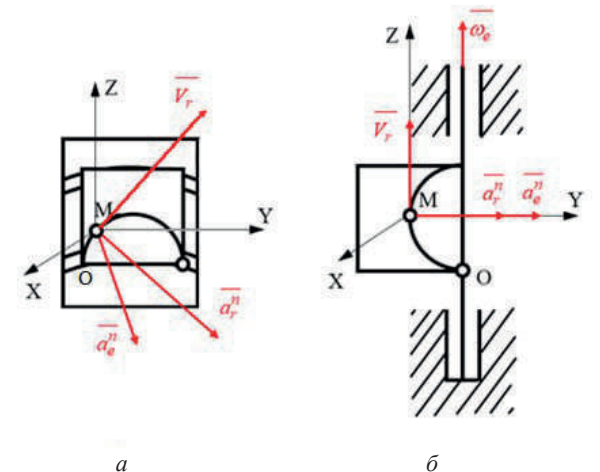


Рисунок 11 — Схемы синтеза КСДТ, построенные по критерию $\bar{a} = a_r^n + a_e^n$

2. Затем к сформированным четырем схемам переносного движения добавляем простые элементы относительного движения:

$$(2e + 5e + 5r), (2e + 4e + 6r); \\ (2e + 4e + 5r), (2e + 4e + 7r).$$

3. На первой сформированной схеме в прямоугольных декартовых осях XYZ показаны векторы

$$\bar{V}_r, \bar{a}_e^n, \bar{a}_r^n, \bar{a}_e^\tau, \bar{a}_r^\tau,$$

на второй – четвертой схемах показаны векторы (рисунок 13):

$$\overline{\omega_e}, \overline{\varepsilon_e}, \overline{V_r}, \overline{a_e^n}, \overline{a_r^n}, \overline{a_e^\tau}, \overline{a_k}.$$

Результат синтеза. Из простых элементов переносного и относительного движений точки M сформировано по две схемы КСДТ, отображающие критерии четвертой группы:

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

Пример 10. Описание алгоритма формирования методами синтеза схем сложного движения точки M из простых элементов конструкций переносного и относительного движений (см. рисунок 9) в соответствии с одним критерием пятой группы – числом и видом векторных слагаемых абсолютного ускорения точки a . Показать на сформированных схемах все векторы кинематических характеристик сложного движения точки, отображающие критерий:

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

1. Сформируем четыре отличные друг от друга схемы переносного движения для одного критерия:

$$(2e + 5e);$$

$$(2e + 4e).$$

2. Затем к сформированным четырем схемам переносного движения добавляются простые элементы относительного движения:

$$(2e + 5e + 7r);$$

$$(2e + 4e + 5r).$$

3. На сформированных схемах в прямоугольных декартовых осях XYZ показаны векторы $\overline{\omega_e}, \overline{\varepsilon_e}, \overline{V_r}, \overline{a_e^n}, \overline{a_r^n}, \overline{a_e^\tau}, \overline{a_k}$ (рисунок 14).

Результат синтеза. Из простых элементов переносного и относительного движений точки M сформированы четыре схемы КСДТ, отображающие критерий пятой группы:

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

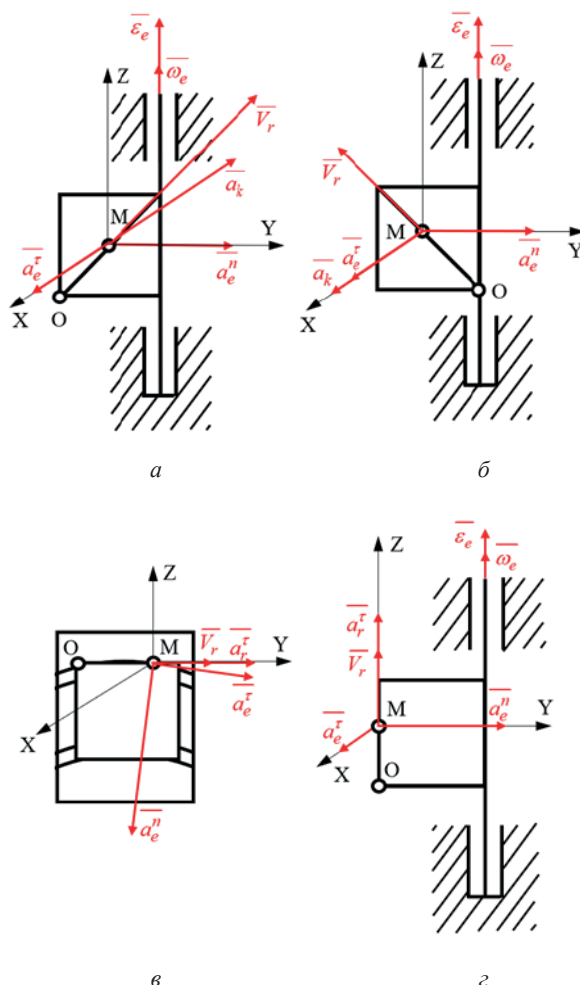


Рисунок 12 – Схемы синтеза КСДТ, построенные по критериям $\overline{a} = \overline{a_e^\tau} + \overline{a_e^n} + \overline{a_k}, \quad \overline{a} = \overline{a_r^\tau} + \overline{a_e^\tau} + \overline{a_e^n}$

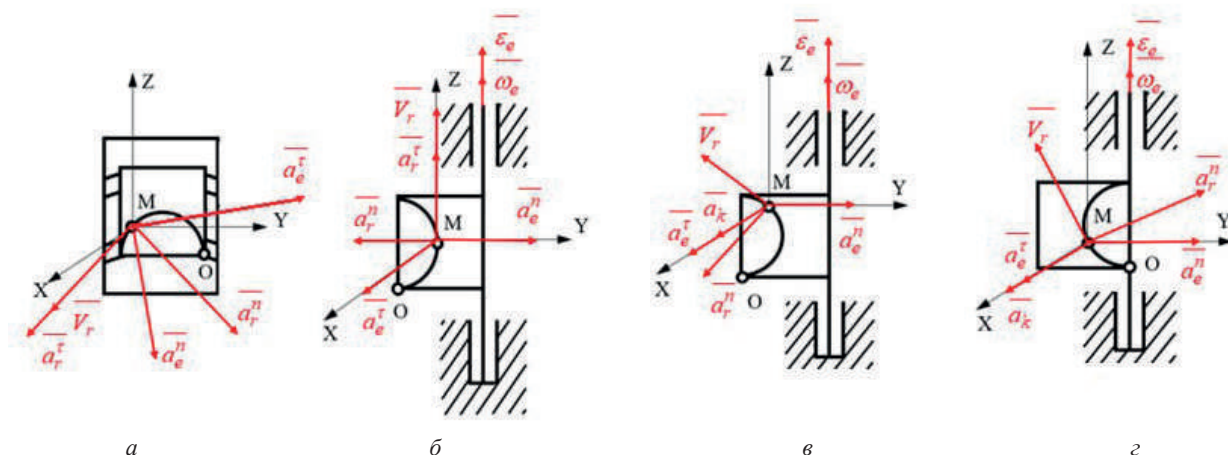


Рисунок 13 – Схемы синтеза КСДТ, построенные по критериям $\overline{a} = \overline{a_r^\tau} + \overline{a_r^n} + \overline{a_e^\tau} + \overline{a_e^n}, \quad \overline{a} = \overline{a_r^n} + \overline{a_e^\tau} + \overline{a_e^n} + \overline{a_k}$

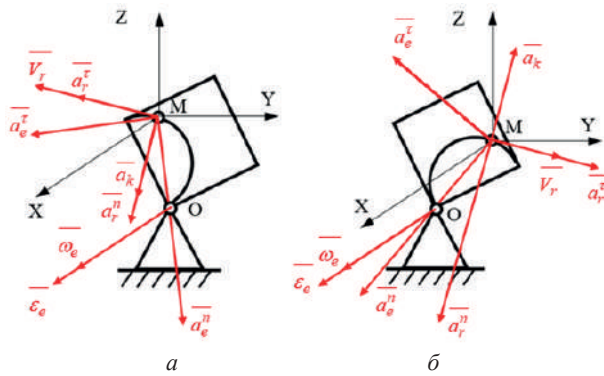


Рисунок 14 — Схемы синтеза КСДТ, построенные по критерию

$$\bar{a} = \bar{a}_r^r + \bar{a}_r^n + \bar{a}_e^r + \bar{a}_e^n + \bar{a}_k$$

Заключение

I. Чтобы сократить разрыв между современными методами проектирования машин и их узлов в виде РММА и знаниями, получаемыми студентами в вузах, необходимо уже сейчас на лекциях и на практических занятиях реализовывать шесть задач статики – 1–6 и пять задач кинематики – 1–5, причем первые две задачи статики и кинематики являются классическими задачами анализа, которые уже давно подробно описаны во всех учебниках по теоретической механике, а задачи 3–5 статики и 3–4 кинематики являются новыми и были впервые рассмотрены в [10]:

Задачи статики:

1. Задача о приведении системы сил.
2. Задача о равновесии системы сил.
3. Задача о рациональном решении ССК.
4. Задача о многокритериальной идентификации ССК.
5. Задача о многокритериальном выборе ССК.

6. Синтез ССК различной сложности.

Задачи кинематики:

1. Задача – по заданному относительному движению точки и движению подвижной системы определить сложное движение.
2. Задача – заданное сложное движение разложить на составляющие движения.
3. Задача о многокритериальной идентификации КСДТ.
4. Задача о многокритериальном выборе КСДТ.
5. Синтез КСДТ.

II. Методы многокритериального синтеза статики составных конструкций реализованы на примерах формирования схем различных по сложности составных конструкций и применены к одноэлементным схемам, двухэлементным схемам, трехэлементным схемам «Мост» и «Ферма».

III. В отличие от решений задач анализа статики, где, как правило, существует единственное решение, в задачах синтеза статики – множество решений. Поэтому при решении одной задачи синтеза можно сформировать множество задач анализа, например, сформированные с помощью простых элементов различные друг от друга статически определимые схе-

мы конструкций I и II (см. рисунок 2) можно удвоить. Для этого достаточно схемы I и II повернуть вокруг точки «А» на 180° по часовой стрелке вокруг оси Z правой тройки ортогональной декартовой системы осей XYZ. Новые схемы III и IV будут отличаться от схем I и II расположением опор.

IV. Аналогично можно удвоить число:

а) трех синтезированных двухэлементных статически определимых схем составных конструкций, показанных на рисунке 4 (можно ввести специальные коды – «СТ-11», «СТ-20», «СТ-02», где первая и вторая цифры означают степень статической определимости-неопределимости первой и второй части конструкции);

б) трех синтезированных трехэлементных статически определимых схем составных конструкций «Мост» и «Ферма», показанных на рисунках 6–8 со специальными кодами «СТ-040», «СТ-121», «СТ-211».

В процессе написания данной работы было синтезировано восемь трехэлементных статически определимых схем составных конструкций «Мост» и «Ферма» со специальными кодами: «СТ-022», «СТ-031», «СТ-040», «СТ-112», «СТ-121», «СТ-130», «СТ-211», «СТ-220», однако в статью вошли только три схемы.

V. Описан алгоритм формирования методами многокритериального синтеза 14 схем сложного движения точки M, состоящих из простых элементов конструкций переносного и относительного движений (см. рисунок 9) в соответствии с четырнадцатью критериями – числом и видом векторных слагаемых абсолютного ускорения точки a, взятыми из пяти групп критериев.

VI. В отличие от решений задач анализа КСДТ, где, как правило, существует единственное решение, в задачах синтеза КСДТ – множество решений. Поэтому при решении одной задачи синтеза КСДТ можно создавать множество задач анализа КСДТ, например, сформированные с помощью простых элементов различные друг от друга схемы КСДТ можно увеличить за счет введения новых простых элементов, что позволяет студентам самим формировать задачи и задачки по теоретической механике.

VII. Решение этих задач позволят студентам приобрести новые знания о методах рационального решения, идентификации, выбора, многокритериального синтеза задач ССК и КСДТ. При этом у них формируются навыки многокритериального мышления. Это поможет им в будущей трудовой деятельности – при создании линейки новых моделей машин на стадии их проектирования; модернизации существующих машин; проектировании и создании новых технологических процессов и перспективных моделей техники.

VIII. Для обеспечения инженерной подготовки студентов очевидно необходимость включения в классический курс теоретической механики подробное описание всех актуальных задач анализа, рационального решения, идентификации, выбора и многокритериального синтеза ССК и КСДТ и разработки соответствующих учебников.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГНТП «Машиностроение» подпрограмма «Белавтотракторостроение»: отчет о НИР за 2001–2005 годы (заключ. 2 части) / Белор. национ. технич. ун-т: рук. Ю. А. Гурвич. – Минск, 2005. – Ч. 1 – 118 с. – № ГР 20012549.
2. ГНТП «Машиностроение» подпрограмма «Белавтотракторостроение»: отчет о НИР за 2001–2005 годы (заключ. 2 части) / Белор. национ. технич. ун-т: рук. Ю. А. Гурвич. – Минск, 2005. – Ч. 2 – 122 с. – № ГР 2001255.
3. ГНТП «Машиностроение» подпрограмма «Карьерная техника»: отчет о НИР за 2006–2007 годы (заключ.) / Белор. национ. технич. ун-т: рук. Ю. А. Гурвич. – Минск, 2007. – 65 с. – № ГР 20066238.
4. Развитие теории и разработка механико-математического описания динамики управляемых осей автотранспортных средств в эксплуатационных режимах на основе критериев управляемости и устойчивости: отчет о НИР за 2006–2010 годы по ГКПНИ «Механика», «Шифр: Механика – 2.44» (заключ.) / Белор. национ. технич. ун-т: рук. Ю. А. Гурвич. – Минск, 2010. – 152 с. – № ГР 20064252.
5. ГНТП «Машиностроение» подпрограмма «Тракторостроение»: отчет о НИР за 2008–2010 годы (заключ.) / Белор. национ. технич. ун-т: рук. Ю. А. Гурвич. – Минск, 2010. – 74 с. – № ГР 20083539. Развитие теории и разработка механико-математического описания динамики многоосных и шарнирно-сочлененных автотранспортных средств в эксплуатационных режимах на основе критериев управляемости, устойчивости, безопасности движения, плавности хода и износа шин: отчет о НИР за 2011–2015 годы по ГПНИ «Механика, техническая диагностика, металлургия», «Шифр: Механика, техническая диагностика, металлургия 1.06» (заключ.) / Белор. национ. технич. ун-т: рук. Ю. А. Гурвич. – Минск, 2015. – 140 с. – № ГР 20122239.
6. Гурвич, Ю. А. Многокритериальное проектирование управляемых неразрезных осей грузовых автомобилей / Ю. А. Гурвич // Сборник научных статей военной академии Республики Беларусь. – 2018. – № 35. – С. 72–80.
7. Гурвич, Ю. А. Обоснование методики и программного продукта многокритериальной оптимизации параметров различных конструкций рулевых трапеций семейства грузовых автомобилей / Ю. А. Гурвич // Машиностроение: респ. межведомств. сб. науч. тр. – Минск : БНТУ, 2018. – Вып. 31. – С. 153–167.
8. Гурвич, Ю. А. Экспериментально-аналитический метод параметрической идентификации процесса качения колеса с шиной / Ю. А. Гурвич // Авиационный вестник. – 2021. – № 5. – С. 29–44.
9. Гурвич, Ю. А. Многокритериальная идентификация и выбор в теоретической механике / Ю. А. Гурвич, А. Ю. Демко, О. С. Порожнюк // Авиационный вестник. – 2022. – № 6. – С. 26–42.
10. Аппель, П. Теоретическая механика: в 2 т. / П. Аппель. – М.: Физматгиз, 1960. – Том I. – 515 с.
11. Аппель, П. Теоретическая механика: в 2 т. / П. Аппель. – М.: Физматгиз, 1960. – Том II. – 487 с.
12. Лурье, А. И. Аналитическая механика / А. И. Лурье. – М.: Физматгиз, 1961. – 824 с.
13. Космодемьянский, А. А. Курс теоретической механики: в 2 ч. / А. А. Космодемьянский. – М.: Просвещение, 1965. – Ч. I. – 538 с.
14. Космодемьянский, А. А. Курс теоретической механики: в 2 ч. / А. А. Космодемьянский. – М.: Просвещение, 1966. – Ч. II. – 599 с.
15. Бутенин, Н. В. Курс теоретической механики: в 2 т. / Н. В. Бутенин, Я. Л. Лунц, Д. Р. Меркин. – М.: Наука, 1970. – Том I. Статика и кинематика. – 240 с.
16. Бутенин, Н. В. Курс теоретической механики: в 2 т. / Н. В. Бутенин, Я. Л. Лунц, Д. Р. Меркин. – М.: Наука, 1971. – Том II. Динамика. – 464 с.
17. Кильчевский, Н. А. Курс теоретической механики: в 2 ч. / Н. А. Кильчевский. – М.: Наука, 1977. – Ч. I. – 479 с.
18. Кильчевский, Н. А. Курс теоретической механики: в 2 ч. / Н. А. Кильчевский. – М.: Наука, 1977. – Ч. II. – 543 с.
19. Гурвич, Ю. А. Синтез статик составных конструкций / Ю. А. Гурвич, Д. А. Копелев // Теоретическая и прикладная механика. – Минск : Технопринт, 2002. – С. 54–57.
20. Гурвич, Ю. А. Синтез кинематики и динамики сложного движения точки / Ю. А. Гурвич // Теоретическая и прикладная механика. – Минск : Технопринт, 2002. – С. 57–61.

REFERENCES

1. GNTF "Mechanical Engineering" subprogram "Belavtotractorostroenie": report on research for 2001–2005 years (conclusion 2 parts) / Belor. Nation. technical. un-t: ruk. Y. A. Gurvich. – Minsk, 2005. Part 1 – 118 p. – No GR 20012549, dated 07.07.2001 BelICA.
2. GNTF "Mechanical Engineering" subprogram "Belavtotractorostroenie": report on research for 2001–2005 years (conclusion 2 parts) / Belor. Nation. technical. un-t: ruk. Y. A. Gurvich. – Minsk, 2005. Part 2 – 122 p. – No GR 20012550 dated 07.07.2001 BelICA.
3. GNTF "Mechanical Engineering" subprogram "Career Engineering": report on research for 2006–2007 (concluded) / Belor. Nation. technical. un-t: ruk. Y. A. Gurvich. – Minsk, 2007. – 65 p. – No GR 20066238 dated 15.12.2006 BelICA.
4. Development of the theory and development of a mechanical and mathematical description of the dynamics of the controlled axles of motor vehicles in operational modes based on the criteria of controllability and stability: research report for 2006–2010 for the State Committee for Strategic Research "Mechanics", "Cipher: Mechanics – 2.44" (conclusion) / Belor. Nation. technical. un-t: ruk. Y. A. Gurvich. – Minsk, 2010. – 152 p. – No GR 20064252 dated 16.11.06 BelICA.
5. GNTF "Mechanical Engineering" subprogram "Tractor-building": report on research for 2008–2010 (concluded) / Belor. Nation. technical. un-t: ruk. Y. A. Gurvich. – Minsk, 2010. – 74 p. – No GR 20083539 BelICA.
6. Development of the theory and development of a mechanical and mathematical description of the dynamics of multi-axle and articulated motor vehicles in operational modes based on the criteria of controllability, stability, driving safety, smoothness and tire wear: research report for 2011–2015 on the GPNI "Mechanics, technical diagnostics, metallurgy", "Code: Mechanics, technical diagnostics, metallurgy 1.06" (concluded) / Belor. Nation. technical. un-t: ruk. Y. A. Gurvich. – Minsk, 2015. – 140 p. – No GR. 20122239 BelICA.
7. Gurvich, Y. A. Multi-criteria design of manageable non-cut axes of trucks / Y. A. Gurvich // Collection of scientific articles of the military academy of the Republic of Belarus. – 2018. – № 35. – P. 72–80.
8. Gurvich, Y. A. Justification of the methodology and the program product of the multi-criteria optimization of the parameters of various constructions of the steering trapezoids of the truck family / Y. A. Gurvich // Mashinostroenie: rep. interdepartmental. sb. nauch. Tr. – Minsk : BNTU, 2018. – Vol. 31. – P. 153–167.
9. Gurvich, Y. A. Experimental-analytical method of parametric identification of the process of rolling the wheel with a tire / Y. A. Gurvich // Aviatsonnyi vestnik. – 2021. – № 5. – P. 29–44.
10. Gurvich, Y. A. Multi-criteria identification and selection in theoretical mechanics / Y. A. Gurvich, A. Y. Demko, O. S. Porozhnyuk // Aviatsonnyi vestnik. – 2022. – № 6. – P. 26–42.
11. Appel, P. Theoretical Mechanics. Tom I / P. Appel // – M.: Fizmatgiz, 1960. – 515 p.
12. Appel, P. Theoretical Mechanics. Tom II / P. Appel // – M.: Fizmatgiz, 1960. – 487 p.
13. Lurie, A. I. Analytical mechanics / A. I. Lurie // – M.: Fizmatgiz, 1961. – 824 p.
14. Kosmodemyansky, A. A. Kurs teoreticheskoi mekhaniki. Ch. I / A. A. Kosmodemyansky // – 2012 M.: Prosveshchenie, 1965. – 538 p.
15. Kosmodemyansky, A. A. Kurs teoreticheskoi mekhaniki. Ch. II / A. A. Kosmodemyansky // – M.: Prosveshchenie, 1966. – 599 p.
16. Butenin, N. V. Kurs teoreticheskoi mekhaniki. Tom I. Statics and Kinematics / N. V. Butenin, Y. L. Lunz, D. R. Merkin // – M.: Nauka, 1970. – 240 p.
17. Butenin, N. V. Kurs teoreticheskoi mekhaniki. Volume II. Dynamics / N. V. Butenin, Y. L. Lunz, D. R. Merkin // – M.: Nauka, 1971. – 464 p.
18. Kilchevskii, N. A. Kurs teoreticheskoi mekhaniki. Ch. I / N. A. Kilchevskiy // – M.: Nauka, 1977. – 479 p.
19. Kilchevskii, N. A. Kurs teoreticheskoi mekhaniki. Ch. II / N. A. Kilchevskiy // – M.: Nauka, 1977. – 543 p.
20. Gurvich, Y. A. Sintez statiki sostavnykh konstruktov / Y. A. Gurvich, D. A. Kopelev // Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika. – Minsk. UE "Technoprint", 2002. – P. 54–57.
21. Gurvich, Y. A. Synthesis of kinematics and dynamics of complex movement of the point / Y. A. Gurvich // Theoretical and applied mechanics. – Minsk. UE "Technoprint", 2002. – P. 57–61.

*Статья поступила в редакцию
14.11.2022*

УДК 629.7.05

А. М. КОВАЛЕНКО, А. А. ШЕЙНИКОВ,
А. А. САНЬКО, Л. А. ИВАНИЦКИЙ

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ И ОПТИЧЕСКОЙ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Коваленко Александр Михайлович – военнослужащий учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь», Республика Беларусь

Aliaksandr Kovalenko – Serviceman of Military Academy of the Republic of Belarus, Republic of Belarus

Шейников Алексей Александрович – кандидат технических наук, доцент, военнослужащий учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь», Республика Беларусь
afvarb.ao@gmail.com

Aleksei Sheinikov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Serviceman of Military Academy of the Republic of Belarus, Republic of Belarus
afvarb.ao@gmail.com

Санько Андрей Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, военнослужащий учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
min.777.144@mail.ru

Andrey Sanko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Serviceman of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
min.777.144@mail.ru

Иваницкий Леонид Александрович – магистр технических наук, военнослужащий учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь», Республика Беларусь
leonid210785@mail.ru

Leonid Ivanitski – Master of Technical Sciences, Serviceman of Military Academy of the Republic of Belarus, Republic of Belarus
leonid210785@mail.ru

Аннотация: представлены результаты анализа погрешностей определения координат бесплатформенной инерциальной навигационной системы и бортовой оптико-электронной системы малоразмерного беспилотного летательного аппарата. Определена возможность комплексирования систем для повышения точности определения координат носителя.

Ключевые слова: навигационная система, беспилотный летательный аппарат, точность измерения, координаты позиционирования.

Abstract: presents the results of an analysis of the errors in determining the coordinates of the strapdown inertial navigation system and the on-board optical-electronic system of a small unmanned aerial vehicle. The possibility of combining these systems to increase the accuracy of determining the coordinates of the carrier is estimated.

Keywords: navigation system of unmanned aerial vehicle, measuring systems integration, improving the coordinate estimation accuracy.

Введение

Анализ применения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в вооруженных конфликтах последнего десятилетия показывает необходимость обеспечения режима их автономной навигации в условиях радиоэлектронного противодействия противника [1]. Это связано с активным развитием систем радиоэлектронной борьбы (РЭБ) («Красуха»,

«Шиповник-АЭРО», Комплекс РТР «ПЕЛЕНГ», АСП Р-934Б), которые способны перехватывать управление воздушных роботов [2], или, по крайней мере, подавлять сигналы управления и позиционирования (GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou).

Основным источником навигационной информации на БЛА является бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС), включающая блок чувствительных

элементов (ЧЭ), состоящий из гироскопов и акселерометров. Главным достоинством БИНС является автономность и малые размеры. Существенный недостаток таких систем — это неограниченное накопление ошибок.

Достижение заданного уровня точности позволяют комплексные навигационные системы. Они реализуют принцип избыточности, заключающийся в том, что один и тот

же навигационный параметр определяется несколькими навигационными системами, основанными на различных физических принципах. Так, например, широко применяется комплексная навигационная система на основе БИНС с коррекцией от спутниковой радионавигационной системы (СРНС). Навигационные параметры, полученные с помощью СРНС, не имеют тенденции к накоплению ошибок, но точность измерений зависит от состояния ионосферы и атмосферы Земли (сильная облачность и т. д.). Кроме этого, СРНС подвержены воздействию наземных радиостанций (в том числе воздействию систем РЭБ).

Анализ современных разработок в рассматриваемой области показал [3], что эффективным решением задачи обеспечения автономной навигации является использование информации от бортовых оптико-электронная система (ОЭС) для периодической коррекции ошибок БИНС. Основным отличием этих систем является то, что ошибки ОЭС известны и постоянны по времени.

Постановка задачи

Целью исследований является проведение анализа погрешностей инерциальных и оптических навигационных систем малоразмерного БЛА и поиск путей их комплексирования. В процессе решения задачи требуется:

- оценить погрешности типовых датчиков акселерометров и гироскопов БИНС;
- провести анализ погрешностей определения координат бортовой ОЭС малоразмерного БЛА;
- оценить возможность создания автономной инерциально-оптической навигационной системы (ИОНС), работающей без использования сигналов СРНС.

Решение задачи

Оценка погрешности определения координат БИНС. Современные бесплатформенные инерциальные навигационные системы по уровню точности разделяются на три типа: низкой, средней и высокой точности (таблица 1) [4].

Системы низкой и средней точности применяются в основном на БЛА малого класса («С-350»,

«Москит», «Шершень-П»). В качестве чувствительных элементов таких систем применяют триады гироскопических датчиков угловой скорости, акселерометров и инклинометров. Блоки чувствительных элементов выполнены по технологии MEMS.

Для исследований были выбраны блоки современных микромеханических инерциальных чувствительных элементов компании Sensorog Technologies (производство Норвегия) и компании Analog Devices (производство США). Такое оборудование работает в комплексе со спутниковым приемным модулем. На сегодняшний день STIM300 и ADIS16488 имеют достаточно низкие значения дрейфа нуля и случайных угловых уходов среди микромеханических датчиков [5, 6].

В таблице 2 представлены основные характеристики блоков чувствительных элементов ADIS16488 и STIM300.

Для оценки точности инерциальных чувствительных элементов использовалась приближенная инженерная методика определения погрешностей БИНС по значениям инструментальных погрешностей

их гироскопов и акселерометров [7]. Приведенные в работе соотношения позволяют оценить погрешности, не прибегая к моделированию работы БИНС на МЭМС датчиках. При этом соотношения для составляющих ошибки могут быть получены с использованием паспортных данных инерциальной системы.

В таблицах 3 и 4 представлены формулы, характеризующие вклад погрешностей гироскопов и акселерометров в погрешности БИНС на коротком интервале времени (0–10 мин), когда можно пренебречь шулеровскими колебаниями [8].

Влияние систематических погрешностей.

Систематические погрешности рассматривались как случайные величины со среднеквадратическими отклонениями (СКО) $\sigma_{\text{sys}}^{\text{gyro}}$, σ_{sys}^a . Результаты расчетов показали, что систематические погрешности блока гироскопов вносят больший вклад в ошибку определения координат, чем погрешности блока акселерометров. Вклад систематических погрешностей блоков чувствительных элементов STIM300 и ADIS16488 представлен на рисунке 1, а.

Таблица 1 – Классификация БИНС по уровню точности [4]

Тип БИНС	Погрешность определения углов, град/ч	Погрешность определения координат, км/ч	Тип применяемых чувствительных элементов	Пример системы
Низкой точности	0,5–1,0	5,5–37,0	MEMS	GL-SVG-02 (Россия)
Средней точности	0,1–0,5	1,5–5,5	Волоконно-оптические гироскопы	GL-SVG-03 (Россия); LN120G (США)
Высокой точности	0,01–0,1	0,4–1,85	Кольцевые лазерные гироскопы	GL-90 (Россия); LN251 (США)

Таблица 2 – Основные характеристики блоков чувствительных элементов ADIS16488 и STIM300 [7]

Параметр	Значение для ADIS16488		Значение для STIM300	
	Канал гироскопа	Канал акселерометра	Канал гироскопа	Канал акселерометра
Систематические погрешности	5 град/ч	10–3 м/с ²	3 град/ч	7·10 ⁻⁴ м/с ²
Погрешность масштабного коэффициента	0,01 %	0,01 %	0,01 %	0,01 %
Характеристики шума	0,300 рад/с	0,029 м/с ²	0,150 рад/с	0,060 м/с ²
Нестабильность нуля	5,10 рад/с	0,45 м/с ²	0,50 рад/с	0,05 м/с ²

Таблица 3 — Зависимости ошибок БИНС от инструментальных погрешностей гироскопов [8]

Погрешность	Погрешность угла, рад	Погрешность линейной скорости, м/с	Погрешность координаты, м
Систематическая составляющая, σ_{syst}^{gyro} , рад/с	$\sigma_{syst}^{gyro} t$	$0,5\sigma_{syst}^{gyro} g t^2$	$0,167\sigma_{syst}^{gyro} g t^3$
Погрешность масштабного коэффициента, $\sigma_{\Delta k}^{gyro}$, %	$\sigma_{\Delta k}^{gyro} t / 100$	$0,005\sigma_{\Delta k}^{gyro} g \dot{\vartheta} t^2$	$0,0017\sigma_{\Delta k}^{gyro} g \dot{\vartheta} t^3$
Шум ARW , рад/с	$ARW \sqrt{t}$	$\frac{g}{\sqrt{3}} ARW t^{3/2}$	$\frac{g}{2\sqrt{5}} ARW t^{5/2}$
Нестабильность нуля (время корреляции $T_c^{\Delta\omega} > 1000$ с) $\sigma_{BI}^{\Delta\omega}$, рад/с	$\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{\sigma_{BI}^{\Delta\omega}}{\sqrt{T_c^{\Delta\omega}}} t^{3/2}$	$\sqrt{\frac{1}{10}} \cdot \frac{\sigma_{BI}^{\Delta\omega} g}{\sqrt{T_c^{\Delta\omega}}} t^{5/2}$	$\sqrt{\frac{1}{126}} \cdot \frac{\sigma_{BI}^{\Delta\omega} g}{\sqrt{T_c^{\Delta\omega}}} t^{7/2}$

Таблица 4 — Зависимости ошибок БИНС от инструментальных погрешностей акселерометров [8]

Погрешность	Погрешность линейной скорости, м/с	Погрешность координаты, м
Систематическая составляющая σ_{syst}^a , м/с ²	$\sigma_{syst}^a t$	$0,5\sigma_{syst}^a t^2$
Погрешность масштабного коэффициента $\sigma_{\Delta k}^a$, %	$\sigma_{\Delta k}^a \dot{V}_x t / 100$	$0,005\sigma_{\Delta k}^a \dot{V}_x t^2$
Шум VRW , м/с ²	$VRW \sqrt{t}$	$\frac{1}{\sqrt{3}} VRW t^{3/2}$
Нестабильность нуля σ_{BI}^a ($T_c^{\Delta a} > 1000$ с), м/с ²	$\sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\sigma_{BI}^a}{\sqrt{T_c^{\Delta a}}} t^{3/2}$	$\sqrt{\frac{1}{10}} \frac{\sigma_{BI}^a}{\sqrt{T_c^{\Delta a}}} t^{5/2}$

Влияние погрешностей коэффициентов преобразования.

Согласно [5, 6] погрешность масштабного коэффициента выбранных ЧЭ составляет не более $\sigma_{\Delta k}^{gyro} = \sigma_{\Delta k}^a = 0,01$ % (см. таблицы 2, 3). Оценка погрешности БИНС проводилась при постоянных значениях угловой скорости $\dot{\vartheta} = 1^\circ/\text{с}$ и ускорения $g = 1$. Расчеты показали, что нестабильность нуля всего в 0,01 % может привести к значительным погрешностям БИНС (рисунок 1, б), которые будут определяться динамикой подвижного объекта.

Влияние шума гироскопов и акселерометров.

Для оценки характеристик шума гироскопов и акселерометров использовались величины ARW (Angle Random Walk — случайное блуждание угла) и VRW (Velocity Random Walk — случайное блуждание скорости). Влияние шума гироскопов и акселерометров на значение погрешности БИНС показано на рисунке 1, в.

Влияние нестабильности нуля гироскопов и акселерометров.

Нестабильность нуля (Bias Instability) обусловлена шумом в электронных компонентах съема и обработки информации гироскопов (акселерометров). Она связана с фликкер-шумом (Flickernoise), имеющим спектральную плотность обратно пропорциональную частоте [9]. При расчетах использовался подход, основанный на описании нестабильности нуля марковским случайным процессом [10]. Такой процесс может быть получен путем пропускания белого шума единичной интенсивности через апериодическое звено вида:

$$W(s) = \frac{\sigma_{BI} \sqrt{2T_c}}{T_c s + 1}, \quad (1)$$

где T_c — время корреляции (интервал времени, разделяющий отсчеты, которые можно считать некоррелированными);

σ_{BI} — СКО нестабильности нуля, рад/с.

Из выражения (1) следует, что чем больше время корреляции, тем меньше темп накопления погрешностей БИНС.

Результаты расчета погрешностей координат, обусловленных нестабильностью нуля гироскопа для чувствительных элементов STIM300 и ADIS16488, представлены на рисунке 1, г.

Суммарная ошибка БИНС от инструментальных погрешностей гироскопов при определении координат рассчитывалась следующим образом:

$$\sigma_{\text{БИНС}} = \sqrt{\sigma_{gyro}^2 + \sigma_a^2}; \quad (2)$$

$$\sigma_{\Sigma}^{gyro} = \sqrt{(\sigma_{syst}^{gyro})^2 + (\sigma_{\Delta k}^{gyro})^2 + (ARW)^2 + (\sigma_{BI}^{\Delta\omega})^2}; \quad (3)$$

$$\sigma_{\Sigma}^a = \sqrt{(\sigma_{syst}^a)^2 + (\sigma_{\Delta k}^a)^2 + (VRW)^2 + (\sigma_{BI}^a)^2}. \quad (4)$$

На рисунке 2 представлены результаты расчета суммарных погрешностей определения координат чувствительными элементами ADIS16488 и STIM300.

Анализ инструментальных погрешностей типовых датчиков акселерометров и гироскопов малоразмерных БЛА показал, что инерциальные навигационные системы быстро накапливают ошибку и требуют периодической коррекции от более точных датчиков.

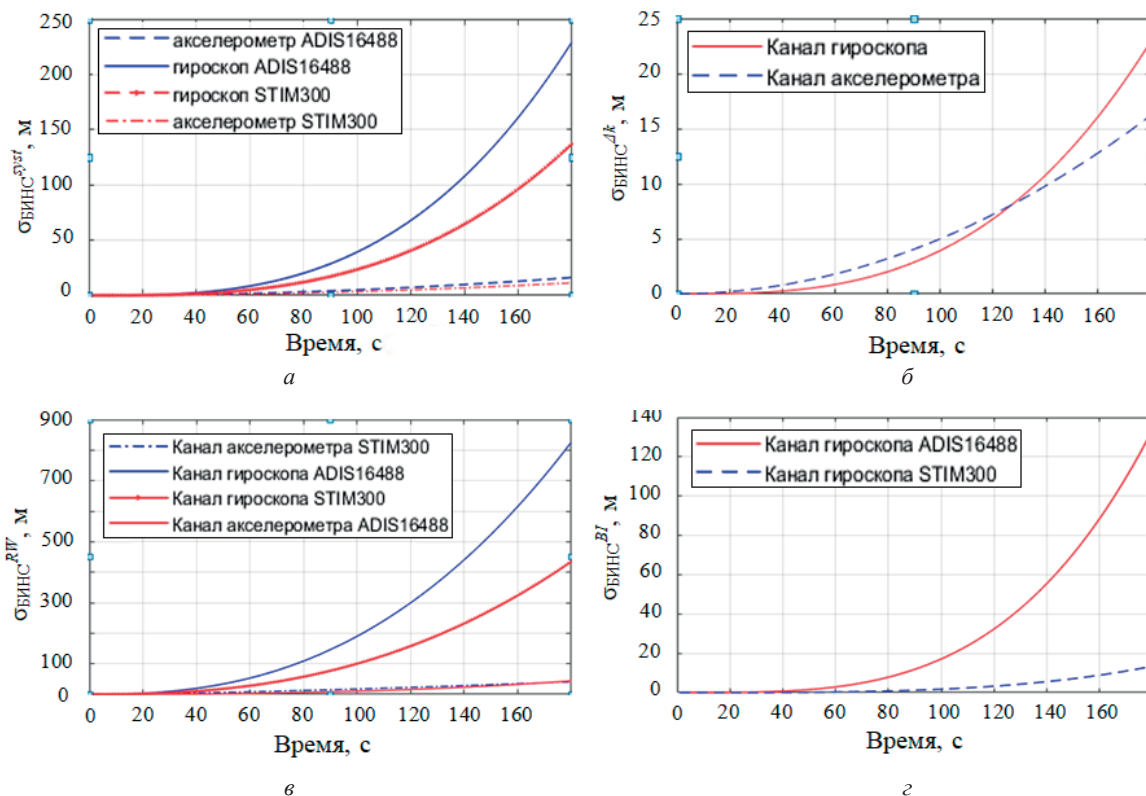


Рисунок 1 — Влияние погрешностей гироскопов и акселерометров на значение СКО ошибки определения координат БИНС:
 а — влияние систематических погрешностей; б — влияние погрешностей коэффициентов преобразования;
 в — влияние шума гироскопов и акселерометров; г — влияние нестабильности нуля гироскопов и акселерометров

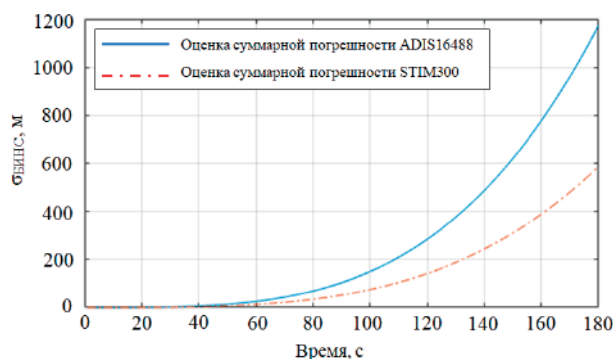


Рисунок 2 — Результаты сравнительного анализа суммарных погрешностей определения координат чувствительными элементами ADIS16488 и STIM300

Оценка погрешностей при определении координат по цифровым изображениям.

В [11] предложен облик подсистемы коррекции ошибок инерциальной навигационной системы (ИНС) БЛА с помощью бортовой ОЭС (БЛА осуществляет прямолинейный полет вдоль линии заданного пути, бортовая камера жестко закреплена в центре масс БЛА, оптическая ось камеры направлена в надир). Эта подсистема вступает в действие при потере сигналов СРНС (например, при попадании БЛА в зону действия средств РЭБ). Задача подсистемы заключается

в оценке линейного бокового отклонения центра масс БЛА от линии заданного пути (δ) и выдачи сигнала коррекции БИНС (маршрутный способ навигации).

Алгоритм работы подсистемы включает следующие действия:

1. Периодическая фиксация ОЭС БЛА группы наиболее контрастных пикселей в верхней части кадра пролетаемого участка местности.

2. Периодическая оценка смещения δ группы зафиксированных пикселей от линии заданного пути (ЛЗП) в процессе прямолинейного горизонтального полета БЛА.

3. Периодическая коррекция ошибок ИНС (с целью вернуть БЛА на ЛЗП) с учетом оцененного значения δ .

Другими словами, в инерциально-оптической навигационной системе бортовая камера является датчиком отклонения БЛА от ЛЗП. Важной задачей при проектировании таких навигационных систем является оценка погрешностей, возникающих в процессе измерения координат контрастных областей изображения.

Погрешность при формировании изображения (погрешность дискретизации).

Чувствительными элементами современных ОЭС БЛА являются матрицы на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС), которые выпускаются в виде монолитной конструкции, объединяющей 4000×4000 элементов, и с более широким диапазоном чувствительных свойств. Регистрация двумерного сигнала осуществляется упорядоченно расположенными в пространстве сенсорами (светочувствительными эле-

ментами матрицы ОЭС). Очевидно, что погрешность определения координат объекта на цифровом изображении обусловлена физическими размерами пикселя.

Используя характеристики бортовой камеры, можно определить размеры участка местности, соответствующие данному пикселю:

$$GSD = \frac{H}{f} a_p, \quad (5)$$

где a_p — физические размеры пикселя;

H — расстояние от БЛА до подстилающей поверхности;

f — фокусное расстояние ОЭС.

Если ширина квадратной матрицы пикселей равна M и поле зрения камеры ν известно, то фокусное расстояние f можно рассчитать по формуле

$$f = \frac{M}{2 \operatorname{tg} \left(\frac{\nu}{2} \right)}. \quad (6)$$

Так, например, цифровая камера GoProHero 4 обеспечивает получение изображения подстилающей поверхности с линейным разрешением 2 м при дальности до объекта 1000 м.

Погрешность определения высоты.

Для вычисления высоты полета малоразмерных БЛА («С-350», «Москит», «Шершень-П») используется информация от бортовых барометрических датчиков с учетом карты высот пролетаемой местности.

Примером датчика абсолютноного давления является полупроводниковый датчик МРЗН-6115А. Он имеет диапазон от 15 до 115 кПа, и его максимальная погрешность ограничена 1,5 % полной шкалы измерений или $\pm 1,5$ кПа. Точность измерений датчика обусловлена ошибками нелинейности, температурной чувствительностью и гистерезисом давления. Опыт применения таких датчиков показал, что ошибка измерения высоты составляет $\sigma_{\text{бар}} = 130$ м. Суммарная погрешность определения высоты над подстилающей поверхностью составляет 5 % от измеряемой высоты.

Погрешность при смещении кадра.

Возмущение атмосферы, собственные вибрации оказывают влияние на положение БЛА в пространстве, что приводит к повороту оптической оси камеры и, как следствие, к смещению

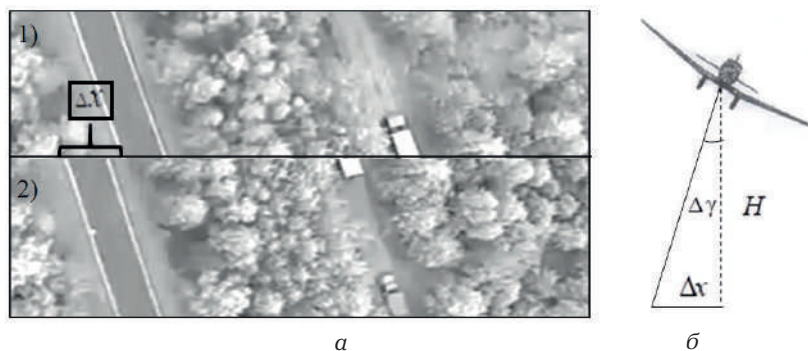


Рисунок 3 — Погрешность смещения кадра, обусловленная возмущениями атмосферы: а — сопоставление последующих кадров; б — изменение угла крена

Таблица 5 — Результаты анализа погрешностей определения координат бортовой ОЭС

Параметр	Погрешность		
	Высота 100 м	Высота 500 м	Высота 1000 м
Погрешность определения координат при формировании изображения, м	0,2	1,0	2,0
Погрешность определения координат при измерении высоты, м	5,0	25,0	50,0
Погрешность определения координат при смещении кадра, м	7,0	35,0	70,0
Общая погрешность определения координат, м	14,0	61,0	132,0

кадра. Особенно это существенно для жестко закрепленных ОЭС («Москит», «Шершень-П»), для которых скорость ветра часто находится в диапазоне от 20 % до 50 % воздушной скорости.

Так, например, на малых БЛА, выполненных по схеме «летающее крыло», и квадрокоптерах изменение угла крена $\Delta\gamma$ (рисунок 3, б) может составлять до 10 градусов [3].

На рисунке 3, а показано наложение друг на друга двух последующих кадров, сделанных с интервалом времени 0,1 с с БЛА «Москит» при прямолинейном полете на высоте 100 м над подстилающей поверхностью. При изменении крена на $\Delta\gamma = 5^\circ$, вызванного случайными возмущениями атмосферы, смещение кадра Δx составляет около 7 м. Таким образом, общая погрешность при определении координат с помощью бортовой ОЭС без гиростабилизированного карданно-

го подвеса для БЛА малого класса составляет 2 % — 3 % от линейного размера кадра.

Увеличение высоты полета над подстилающей поверхностью приводит к увеличению площади, приходящейся на один пиксель изображения, а значит и увеличению погрешности определения координат.

В таблице 5 показаны результаты расчетов погрешностей определения координат, возникающих при использовании бортовой ОЭС малоразмерных БЛА.

На рисунке 4 показаны результаты расчета погрешностей БИНС и ОЭС.

По результатам проведенного анализа видно, что в начальный момент времени ошибки ИНС пренебрежительно малы, но с течением времени наблюдается их рост. Процесс нако-

пления ошибок ИНС имеет экспоненциальный характер. Значения ошибок определения отклонения БЛА от ЛЗП с помощью бортовой ОЭС в начальный момент времени выше значений ошибок ИНС, однако, рассматриваемые ошибки не накапливаются с течением времени. Их значения зависят от характеристик ОЭС, от высоты полета над подстилающей поверхностью, а также от случайных изменений углов ориентации БЛА, обусловленных влиянием турбулентности атмосферы. Значения ошибок ИНС и ошибок ОЭС становятся равными в определенный момент времени. При дальнейшем росте ошибок ИНС с течением времени целесообразно осуществлять коррекцию ИНС по данным бортовой ОЭС. Максимальная периодичность коррекции ИНС выбирается с учетом такого отклонения БЛА от маршрута, при котором ЛЗП еще находится в кадре.

Закключение

Результаты анализа проведенных исследований показывают возможность комплексного использования достоинств ИНС и ОЭС для увеличения точности определения координат БЛА и обеспечения автономности

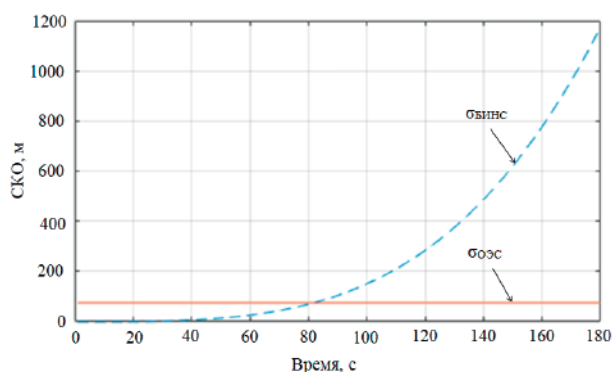


Рисунок 4 — Результат анализа погрешностей БИНС на датчиках ADIS16488 и ОЭС типа GoPro 4

воздушной навигации в условиях отсутствия сигналов СРНС.

Предложенный подход позволяет обосновать выбор значения периодичности коррекции ИНС по данным бортовой ОЭС при известных характеристиках последних, высоте полета БЛА, характере случайных изменений углов ориентации БЛА, обусловленных влиянием турбулентности атмосферы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Маргель, А. Б. Особенности боевого применения беспилотных летательных аппаратов в локальных войнах и вооруженных конфликтах: сб. материалов круглого стола ВВС и войск ПВО «Противодействие ударным беспилотным летательным аппаратам, проблемы и пути их решения» / А. Б. Маргель, О. А. Хожевец. – Минск, 2018. – 185 с.
2. Теодорович, Н. Н. Способы обнаружения и борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами / Н. Н. Теодорович, С. М. Строганова, П. С. Абрамов // Наукосведение. – 2017. – Т. 9, № 1. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/13TVN117.pdf>. – Дата доступа: 10.08.2019.
3. Биард, Р. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика / Р. Биард, Т. Мак Лэйн. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2015. – 312 с.
4. Борисова, А. Ю. Анализ разработок современных беспилотных инерциальных навигационных систем / А. Ю. Борисова, А. В. Самаль // Инженерный вестник. – 2017. – № 5. – С. 50–57.
5. Nov Atel. Документация SpAn OEM-StiM300 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.novatel.com/assets/Documents/papers/OEM-StiM300-pS.pdf>. – Дата доступа: 10.08.2019.
6. Analog Devices. Документация ADIS16488 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADIS16488.pdf>. – Дата доступа: 10.08.2019.
7. Матвеев, В. В. Инженерный анализ погрешностей беспилотной инерциальной навигационной системы / В. В. Матвеев // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2014. – Вып. 9, Ч. 2. – С. 251–266.
8. Матвеев, В. В. Основы построения беспилотных инерциальных навигационных систем: учеб. пособие / В. В. Матвеев, В. Я. Распопов. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор», 2009. – 280 с.
9. Буккингем, М. Шумы в электронных приборах и системах / М. Буккингем. – М.: Мир, 1986. – 399 с.
10. Степанов, О. А. Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации / О. А. Степанов. – СПб.: ГНЦ РФ: ЦНИИ «Электроприбор», 1998. – 370 с.
11. Шейников, А. А. Коррекция ошибок инерциальной навигационной системы беспилотного летательного аппарата по данным бортовой цифровой камеры / А. А. Шейников, А. М. Коваленко // Вестн. ВА РБ. – 2019. – № 1 (62). – С. 66–74.

REFERENCES

1. Margel, A. B. Features of the combat use of unmanned aerial vehicles in local wars and armed conflicts: Sat. materials of the round table of the Air Force and Air Defense Forces "Counteraction to attack unmanned aerial vehicles, problems and ways to solve them". / A. B. Margel, O. A. Khozhevets. – Minsk, 2018. – 185 p.
2. Teodorovich, N. N., Stroganova, S. M., and Abramov, P. S., Methods for detecting and combating small unmanned aerial vehicles // Science. – 2017. – V. 9, no. 1. – [Electronic resource]. – Access mode: <http://naukovedenie.ru/PDF/13TVN117.pdf>. – Access date: 08.10.2019.
3. Biard, R. Small unmanned aerial vehicles: theory and practice / R. Biard, T. McLane. – M.: TECHNOSPHERE, 2015. – 312 p.
4. Borisova, A. Yu. Analysis of developments of modern strapdown inertial navigation systems / A. Yu. Borisova, A. V. Samal // Engineering Bulletin. – 2017. – No. 5. – P. 50–57.
5. Nov Atel. Documentation SpAn OEM-StiM300 [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.novatel.com/assets/Documents/papers/OEM-StiM300-pS.pdf>. – Access date: 08.10.2019.
6. Analog Devices. Documentation ADIS16488 [Electronic resource]. – Access Mode: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADIS16488.pdf>. – Access date: 08.10.2019.
7. Matveev, V. V. Engineering error analysis of a strapdown inertial navigation system / V. V. Matveev // Izvestiya TulGU. Technical science. – 2014. – V. 9, Ch. 2. – P. 251–266.
8. Matveev, V. V. Fundamentals of construction of strapdown inertial navigation systems: textbook. allowance / V. V. Matveev, V. Ya. Raspopov. – SPb.: State Scientific Center of the Russian Federation JSC Concern TsNII Elektropribor, 2009. – 280 p.
9. Buckingham, M. Noises in electronic devices and systems / M. Buckingham. – M.: Mir, 1986. – 399 p.
10. Stepanov, O. A. Application of the theory of nonlinear filtering in the problems of processing navigation information / O. A. Stepanov. – SPb.: State Scientific Center of the Russian Federation: Central Research Institute "Elektropribor", 1998. – 370 p.
11. Sheinikov, A. A. Error correction of the inertial navigation system of an unmanned aerial vehicle according to the data of an onboard digital camera / A. A. Sheinikov, A. M. Kovalenko // Vestn. VA RB. – 2019. – No. 1 (62). – P. 66–74.

Статья поступила в редакцию
20.02.2023

УДК 665.761+532.133

А. А. ШЕГИДЕВИЧ, С. В. ВАСИЛЕВИЧ,
Е. А. ШАПОРОВА, С. О. СТОЙКО

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ВЯЗКОСТНО- ТЕМПЕРАТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АВИАЦИОННЫХ МАСЕЛ

Шегидевич Артем Артурович – кандидат технических наук, ректор учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
academy@bsaa.by

Artem Shegidevich – Candidate of Technical Sciences, Rector of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
academy@bsaa.by

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

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

Шاپорова Елена Анатольевна – кандидат химических наук, заведующий аспирантурой учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
shaporova.e@bgaa.by

Elena Shapороva – Candidate of Chemical Sciences, Head of Postgraduate Studies of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
shaporova.e@bgaa.by

Стойко Сергей Олегович – магистр технических наук, научный сотрудник научно-технического отдела учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
sergey_14_95@mail.ru

Sergey Stoiko – Master of Technical Sciences, Researcher of the Scientific and Technical Department of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
sergey_14_95@mail.ru

Аннотация: одним из важнейших эксплуатационных свойств авиационных масел является прокачиваемость, обеспечивающая смазку, снижение износа и охлаждение элементов узлов трения в пределах рабочих температур. Определяется она пологой вязкостно-температурной характеристикой. Известные в научной литературе эмпирические формулы, описывающие зависимость вязкости масел от температуры, имеют вид различных функций, для использования которых требуется экспериментальное определение целого ряда коэффициентов, зависящих от характеристик конкретной жидкости. В настоящей работе проведены экспериментальные исследования вязкости авиационных масел МС-8П, ТН-600, ТН-98 в интервале температур от 274 К до 447 К. Проанализирована возможность использования известных формул для описания их вязкостно-температурных характеристик в температурных режимах эксплуатации. На основании экспериментальных данных получена более простая и точная математическая зависимость вязкости от температуры в более широком интервале температур. В работе приведены результаты расчетов коэффициентов рассмотренных математических моделей и относительные среднеквадратичные отклонения, на основании которых осуществлялась оценка достоверности аппроксимирующих уравнений. Полученная степенная формула позволит осуществлять расчет динамической и кинематической вязкости авиационных масел и прогнозировать их эксплуатационные свойства в рабочем температурном интервале.

Ключевые слова: авиационные масла, кинематическая вязкость, динамическая вязкость, вязкостно-температурные характеристики, степенная формула.

Abstract: one of the most important operational properties of aviation oils is pumpability, which provides lubrication, wear reduction and cooling of the elements of friction units within operating temperatures. It is determined by a flat viscosity-temperature characteristic. The empirical formulas known in the scientific literature that describe the dependence of the viscosity of oils on temperature have the form of various functions, the use of which requires the experimental determination of a number of coefficients depending on the characteristics of a particular liquid. In this work, experimental studies of the viscosity of aviation oils MS-8P, TN-600, TN-98 were carried out in the temperature

range from 274 K to 447 K. The possibility of using known formulas to describe their viscosity-temperature characteristics in operating temperature conditions is analyzed. On the basis of experimental data, a simpler and more accurate mathematical dependence of viscosity on temperature was obtained in a wide temperature range. The paper presents the results of calculating the coefficients of the considered mathematical models and relative standard deviations, on the basis of which the reliability of the approximating equations was assessed. The resulting power formula will make it possible to calculate the dynamic and kinematic viscosity of aviation oils and predict their performance properties in a wide temperature range.

Keywords: aviation oils, kinematic viscosity, dynamic viscosity, viscosity-temperature characteristics, power formula.

Введение

Режимы работы авиационных масел в двигателях и редукторах силовых установок летательных аппаратов характеризуются высокими температурами в различных условиях трения от жидкостного и граничного до сухого при высоких осевых и радиальных нагрузках в узлах трения, больших скоростях и частотах вращения турбин, в контакте с различными конструкционными материалами, в том числе в условиях высокой аэрации [1]. В связи с этим к маслам предъявляются жесткие требования, учитывающие возможные условия эксплуатации и напряженность работы в двигателе. Одним из свойств масел, характеризующим хорошую прокачиваемость и пусковые свойства, надежное смазывание всех узлов и агрегатов с минимальным износом в пределах рабочих температур, является вязкость. При этом особое внимание уделяется тому, чтобы масла имели пологую вязкостно-температурную характеристику, обеспечивающую постоянство свойств в широком интервале температур от минус 50 °С до плюс 200 °С и выше [2–4].

Поведение вязкости масел с изменением температуры рассматривается в основном в работах, связанных с расчетом кинематической вязкости масел при прокачиваемости их по нефтепроводам в незначительном температурном интервале [5–15]. Практически все имеющиеся в открытых источниках формулы, получены на основе экспериментальных исследований и имеют вид различных функций, содержащих достаточно большое количество эмпирических коэффициентов, зависящих от свойств жидкости. Определение этих коэффициентов в каждом конкретном случае связано с субъективностью и снижением точности с увеличением их количества.

Очевидно, что вязкость масел — это важная характеристика, в значительной степени зависящая от многих параметров (температуры, давления, нали-

чия и свойств присадок, присутствия примесей и др.) и обуславливающая такие эксплуатационные свойства, как смазываемость и прокачиваемость. В то же время математическое описание вязкостно-температурных характеристик авиационных масел в интервале рабочих температур в газотурбинном двигателе в литературе фактически отсутствует. Это обуславливает сложности при прогнозировании эксплуатационных свойств масел и необходимость проведения соответствующих исследований для уточнения возможности использования имеющихся формул и получения более точного и простого математического описания зависимости вязкости авиационных масел от температуры эксплуатации, чему и посвящена настоящая работа.

Методы и результаты измерений

В ходе работы исследовались три типа масел ТУРБОНИКОЙЛ 98 (ТН 98), МС-8П и ТУРБОНИКОЙЛ 600 (ТН 600), широко используемых в настоящее время в гражданской авиации Республики Беларусь.

Определение динамической вязкости авиационных масел проводили методом вискозиметрии с применением ротационного вискозиметра Брукфильда серии DV2T в широком интервале температур от 1 °С (274 К) до 174 °С (447 К) с произвольным шагом в 5 °С–10 °С. Для определения значений температуры исследуемых образцов масел использовался резистивный температурный датчик RTD, измеряющий температуру с погрешностью 0,5 °С. Нагрев масла производили в муфельной печи SNOL 7,2/1300, позволяющей поддерживать постоянную температуру среды до 1300 °С с точностью ±2 °С. Полученные при различных температурах значения динамической вязкости масел ТН-600, МС-8П и ТН-98 приведены в таблице 1.

Таблица 1 — Значения динамической вязкости масел ТН-600, МС-8П и ТН-98 в зависимости от температуры

ТН-600		МС-8П		ТН-98	
<i>T</i> , К	μ , сПз	<i>T</i> , К	μ , сПз	<i>T</i> , К	μ , сПз
279,6	193,2	274,0	100,8	276,8	199,8
289,7	117,6	284,8	76,4	278,0	176,0
295,5	106,2	310,0	48,0	286,6	145,0
296,4	96,4	311,8	44,8	288,0	138,0
304,4	84,4	332,3	31,2	297,8	109,0
311,5	76,0	355,5	22,6	305,3	94,0
323,3	60,8	367,3	20,4	313,1	80,2
330,6	54,8	370,8	18,4	325,0	66,4

Продолжение таблицы 1					
ТН-600		МС-8П		ТН-98	
T, K	$\mu, cПз$	T, K	$\mu, cПз$	T, K	$\mu, cПз$
334,6	50,2	400,3	14,6	341,6	50,4
343,6	42,6	418,5	13,2	358,0	42,4
346,5	40,8	425,7	14,0	366,0	38,0
348,3	39,8	441,6	11,8	375,0	35,2
350,0	40,2	—	—	383,5	32,0
357,6	35,4	—	—	401,5	27,8
351,8	37,4	—	—	403,1	27,0
365,5	32,0	—	—	410,3	25,8
406,6	20,2	—	—	418,3	23,0
418,1	18,6	—	—	435,5	21,8
420,2	18,8	—	—	439,4	21,4
421,5	18,6	—	—	445,0	20,8
447,1	15,6	—	—	—	—

Для последующего определения кинематической вязкости были проведены измерения массы исследуемых масел и их объемов при различных температурах, на основании чего были рассчитаны значения плотностей масел и построены соответствующие графические зависимости от температуры (рисунок 1).

Из рисунка видно, что графические зависимости имеют линейный вид, их аппроксимация позволила получить математические выражения для описания температурных зависимостей плотности исследуемых масел (таблица 2).

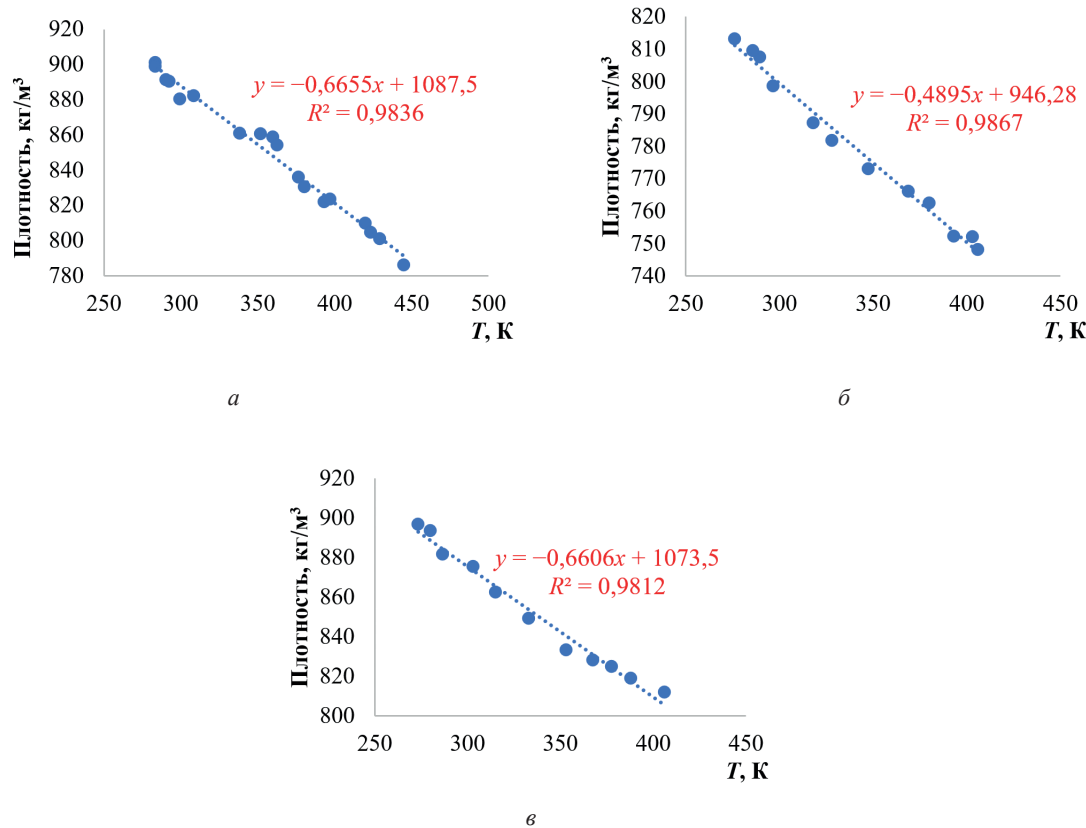


Рисунок 1 — Зависимости плотностей масел ТН-600 (а), МС-8П (б) и ТН-98 (в) от температуры

Во всех трех случаях коэффициент корреляции R^2 близок к 1, т. е. в пределах исследуемых температур полученные уравнения достаточно точно описывают зависимость плотности от температуры.

Используя данные выражения, можно определить значения кинематической вязкости масел как отношение динамической вязкости для каждой температуры (таблица 1) к рассчитанной плотности масел. В таблице 3 приведены значения кинематических вязкостей масел ТН-600, МС-8П и ТН-98 для различных температур.

Таблица 2 – Температурные зависимости плотности масел

Наименование масла	Математическое выражение температурной зависимости плотности	Коэффициент корреляции
Масло ТН-600	$\rho = 1087,5 - 0,6655T$	$R^2 = 0,9836$
Масло МС-8П	$\rho = 946,28 - 0,4895T$	$R^2 = 0,9867$
Масло ТН-98	$\rho = 1073,5 - 0,6606T$	$R^2 = 0,9812$

Таблица 3 – Значения кинематической вязкости масел ТН-600, МС-8П и ТН-98

ТН-600		МС-8П		ТН-98	
T, K	$\nu, \text{мм}^2/\text{с}$	T, K	$\nu, \text{мм}^2/\text{с}$	T, K	$\nu, \text{мм}^2/\text{с}$
279,6	148,6	274,0	129,2	276,8	224,3
289,7	128,8	284,8	99,1	278,0	197,8
295,5	116,9	310,0	84,5	286,6	164,0
296,4	106,2	311,8	66,1	288,0	156,2
304,4	93,5	332,3	53,6	297,8	124,3
311,5	84,7	355,5	41,1	305,3	107,8
323,3	68,3	367,3	28,6	313,1	92,5
330,6	61,9	370,8	24,8	325,0	77,3
334,6	56,9	400,3	21,1	341,6	59,4
343,6	48,6	418,5	18,8	358,0	50,6
346,5	46,7	425,7	16,9	366,0	45,7
348,3	45,6	441,6	16,2	375,0	42,6
350,0	46,1	—	—	383,5	39,0
357,6	40,9	—	—	401,5	34,4
351,8	42,9	—	—	403,1	33,4
365,5	37,2	—	—	410,3	32,1
406,6	25,6	—	—	418,3	28,8
418,1	24,7	—	—	435,5	27,7
420,2	25,0	—	—	439,4	27,3
421,5	22,6	—	—	445,0	26,7
447,1	20,8	—	—	—	—

Обработка полученных данных

Для описания влияния температуры на кинематическую вязкость в данном исследовании использовались:

1) формула Вальтера [5, 6]:

$$\lg(\lg(\nu + c)) = a + b \cdot \lg(T), \quad (1)$$

где a , b и c — эмпирические коэффициенты, характеризующие исследуемую жидкость;

2) формула Рейнольдса — Филонова [6 — 10]:

$$\ln(\nu) = a + b \cdot T, \quad (2)$$

где a , b — эмпирические коэффициенты, характеризующие исследуемую жидкость;

3) формула Фогеля — Фулчера — Таммана [7, 11 — 15]:

$$\nu = \nu_{\infty} e^{\frac{b}{T-\theta}}, \quad (3)$$

где ν_{∞} , b и θ — эмпирические коэффициенты, характеризующие исследуемую жидкость.

Для описания влияния температуры на динамическую вязкость использовались:

1) формула Рамайя [16, 17]:

$$\sqrt{\ln(\mu)} = a + b / T, \quad (4)$$

где a и b — эмпирические коэффициенты, характеризующие исследуемую жидкость;

2) формула Френкеля – Эйринга [16, 17]:

$$\mu = a \cdot e^{\frac{E}{RT}}, \quad (5)$$

где a – эмпирический коэффициент, характеризующий исследуемую жидкость (предэкспоненциальный член);

$R = 8,314 \text{ Дж/(моль·К)}$ – универсальная газовая постоянная;

E – свободная энергия активации вязкостного течения, Дж/моль.

3) формула Бачинского [17]:

$$\mu = \frac{c}{V_m - b} = \frac{c}{\frac{m}{\rho} - b}, \quad (6)$$

где b и c – эмпирические коэффициенты, характеризующие исследуемую жидкость;

V_m – молярный объем жидкости, м³/моль;

m – молярная масса жидкости, кг/моль.

Так как значение молярной массы неизвестно, данное уравнение можно записать следующим образом:

$$\mu = \frac{A}{\frac{1}{\rho} - B}. \quad (7)$$

На основании полученных в работе экспериментальных значений динамической и кинематической вязкости в зависимости от температуры авторами предлагается степенная формула, которая в общем виде записывается следующим образом:

$$\mu = \left(\frac{A}{T - B} \right)^C, \quad (8)$$

$$\nu = \left(\frac{A}{T - B} \right)^C,$$

где A , B и C – эмпирические коэффициенты, характеризующие исследуемую жидкость.

Экспериментально полученные значения динамической и кинематической вязкости сравнивались с данными, полученными расчетным путем с использованием описанных выше формул других авторов. Оценка применимости формул осуществлялась путем сравнения значений относительных среднеквадратических отклонений (СКО) [6]. Относительное СКО (на примере кинематической вязкости) определялось по формуле

$$\delta = \frac{\sigma}{v_{\max} - v_{\min}}, \quad (9)$$

где σ – СКО, определяемое по формуле (10);

$v_{\max}$ – наибольшее значение кинематической вязкости в массиве данных, мм²/с;

$v_{\min}$ – наименьшее значение кинематической вязкости в массиве данных, мм²/с;

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_{i,c} - v_{i,m})^2}, \quad (10)$$

где n – количество экспериментальных точек;

$v_{i,c}$ – расчетное значение кинематической вязкости, мм²/с;

$v_{i,m}$ – измеренное значение кинематической вязкости, мм²/с.

Относительное СКО для динамической вязкости определялось аналогично.

Для определения эмпирических коэффициентов в уравнениях (1) – (8) и построения математических зависимостей вязкости от температуры необходимо на основании полученных экспериментальных данных, приведенных в таблицах 1 и 2, построить графики следующих зависимостей:

1. Для формулы Вальтера $\lg(\lg(\nu + c)) = F(\lg(T))$ коэффициент c определяется подстановкой с учетом наибольшей приближенности графика линейной зависимости. Остальные коэффициенты определяются из уравнения линейной аппроксимации полученного графика.

2. Для формулы Рейнольдса – Филонова $\ln(\nu) = F(T)$ коэффициенты определяются из уравнения линейной аппроксимации полученного графика.

3. Для формулы Фогеля – Фулчера – Таммана $\ln(\nu) = F\left(\frac{1}{T - \Theta}\right)$ коэффициент Θ определяется подстановкой с учетом наибольшей приближенности графика линейной зависимости. Остальные коэффициенты определяются из уравнения линейной аппроксимации полученного графика.

4. Для формулы Рамайя $\sqrt{\ln(\mu)} = F\left(\frac{1}{T}\right)$ коэффициенты определяются из уравнения линейной аппроксимации полученного графика.

5. Для формулы Френкеля – Эйринга $\ln(\mu) = F\left(\frac{1}{T}\right)$ коэффициенты определяются из уравнения линейной аппроксимации полученного графика.

6. Для формулы Бачинского $\frac{1}{\mu} = F\left(\frac{1}{\rho}\right)$ коэффициенты определяются из уравнения линейной аппроксимации полученного графика.

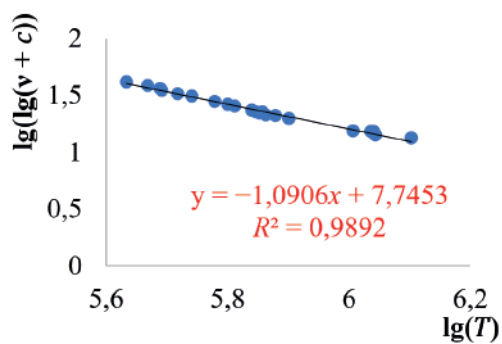
7. Для степенных формул $\ln\left(\frac{1}{\mu}\right) = F(\ln(T - B))$ коэффициенты определяются уравнением $\ln\left(\frac{1}{\nu}\right) = F(\ln(T - B))$.

Графики описанных выше зависимостей для масел ТН-600, МС-8П и ТН-98 приведены на рисунках 2–4 соответственно.

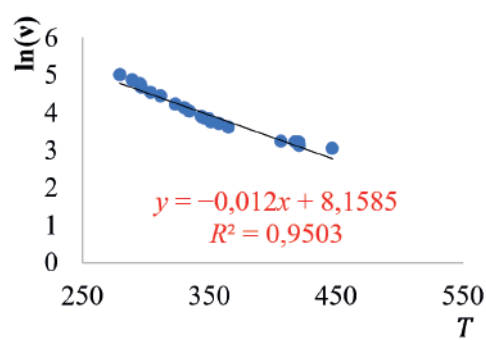
Используя уравнения аппроксимации, представленные на графиках (рисунки 2–4), были получены выражения зависимостей кинематической и динамической вязкости от температуры. Данные выражения приведены в таблице 4. Для каждой формулы было определено значение относительного СКО по формулам (9) и (10). Полученные результаты приведены в таблице 5.

Из таблицы 4 видно, что наименьшее относительное СКО при описании влияния температуры на вязкость почти во всех случаях характерно для степенной формулы. Исключением является зависимость кинематической вязкости от температуры для масла МС-8П. В данном случае наилучший результат показала формула Фогеля – Фулчера – Таммана, хотя и здесь относительное СКО имеет близкое значение величине СКО степенной формулы.

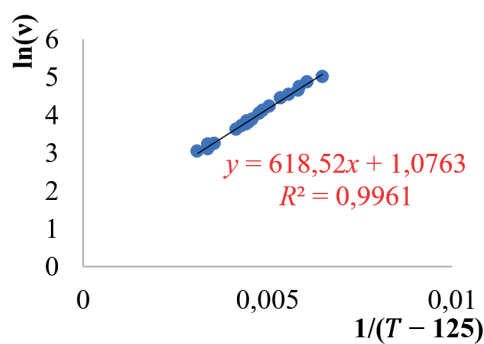
На рисунке 5 представлены графики зависимости кинематической (а) и динамической (б) вязкости от температуры. На графиках символами показаны экспериментальные значения, а линиями – расчетные, полученные с использованием степенной формулы.



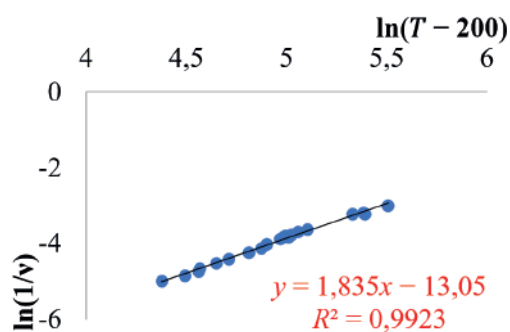
a



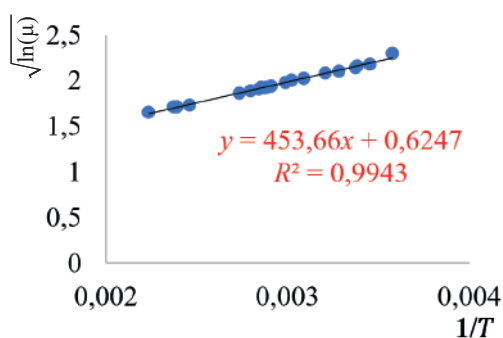
б



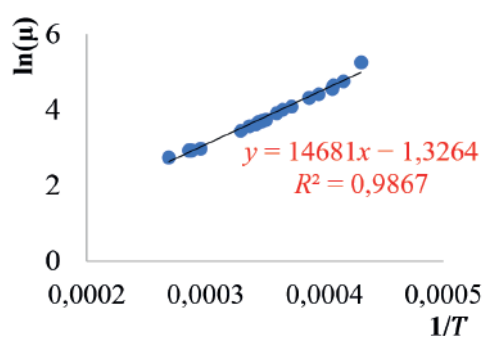
в



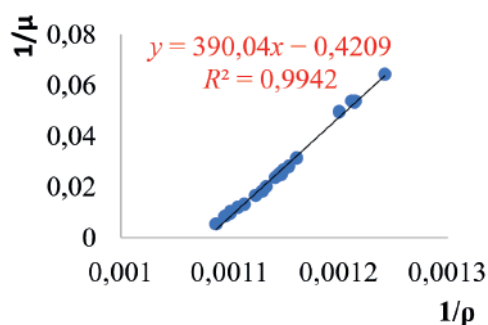
г



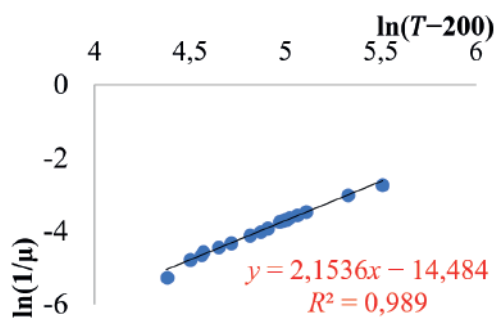
д



е

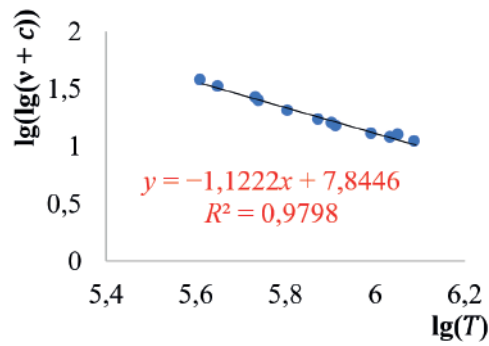


ж

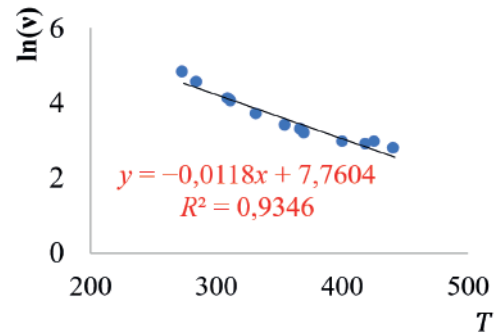


з

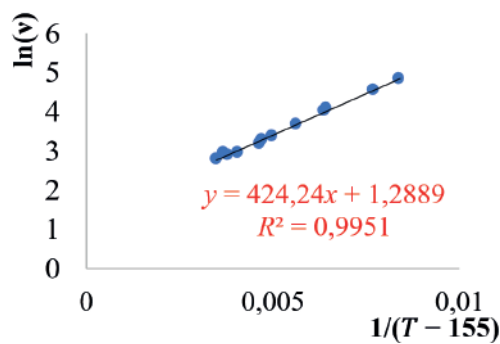
Рисунок 2 — Вязкостно-температурные зависимости, полученные по формулам Вальтера (*a*), Рейнольдса — Филонова (*б*), Фогеля — Фуллера — Таммана (*в*), Рамаяя (*д*), Френкеля — Эйринга (*е*, *ж*), по степенной формуле кинематической вязкости (*г*) и динамической вязкости (*з*) для масла ТН-600



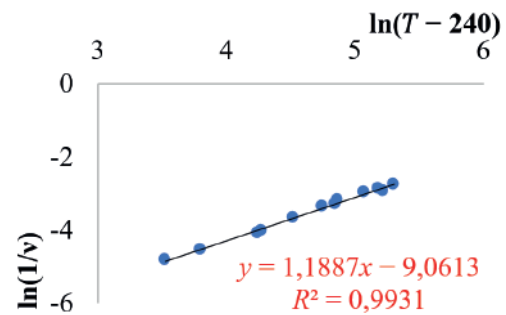
a



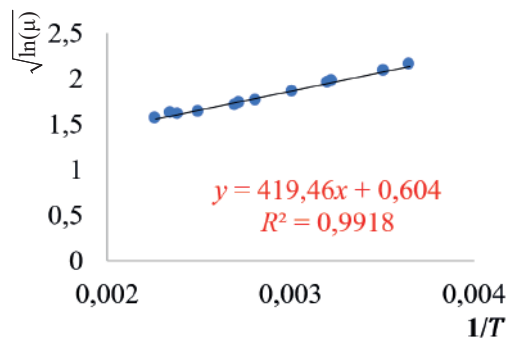
б



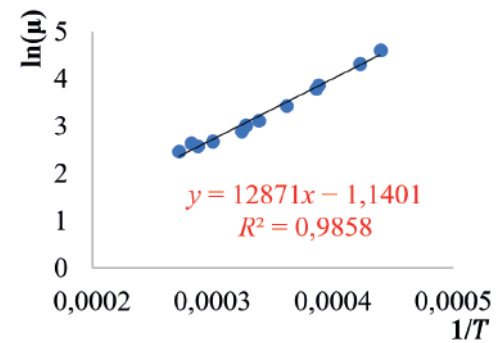
в



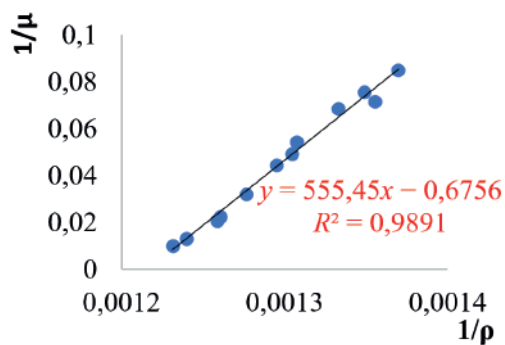
г



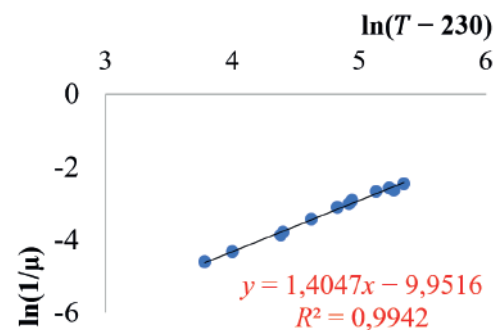
д



е

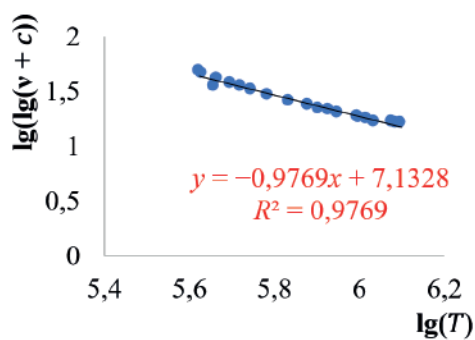


ж

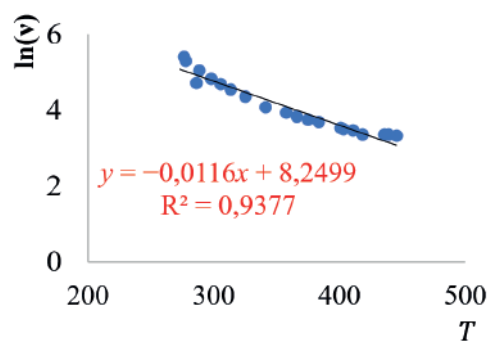


з

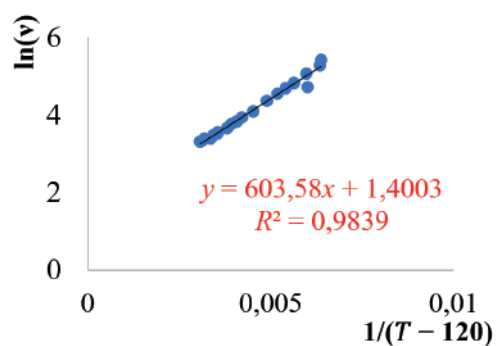
Рисунок 3 — Вязкостно-температурные зависимости, полученные по формулам Вальтера (а), Рейнольдса — Филонова (б), Фогеля — Фуллера — Таммана (в), Рамайя (д), Френкеля — Эйринга (е, ж), по степенной формуле кинематической вязкости (г) и динамической вязкости (з) для масла МС-8П



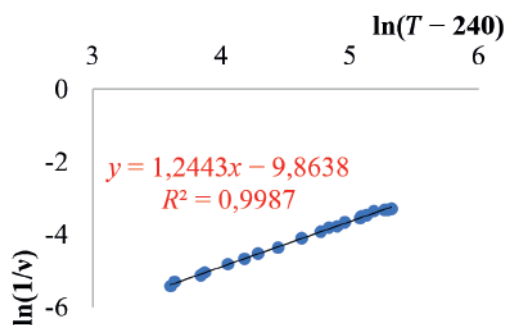
a



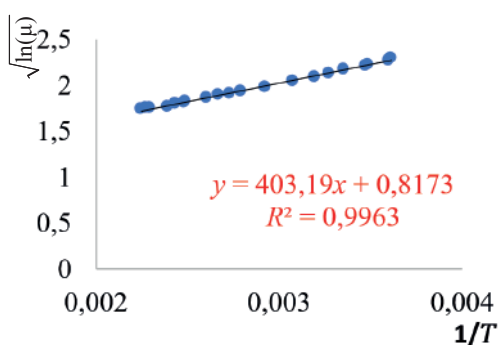
б



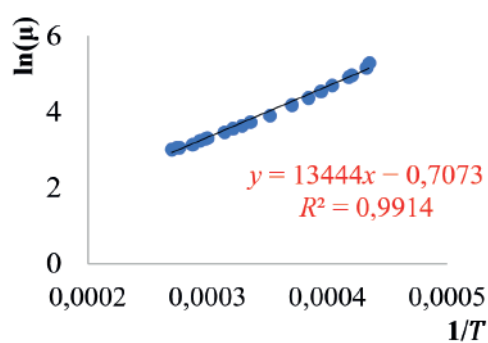
в



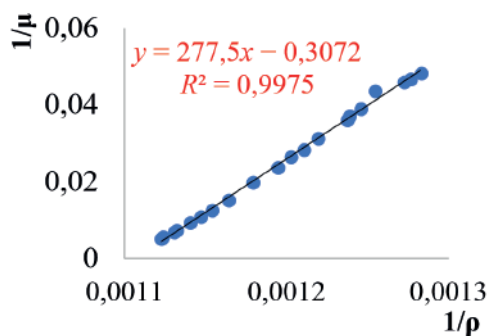
г



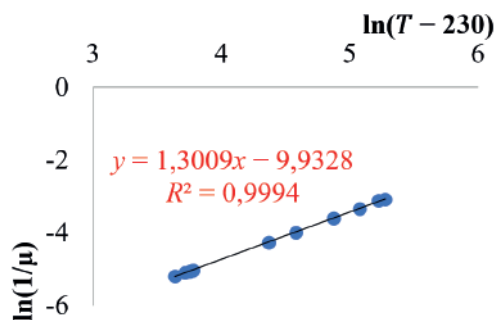
д



е



ж



з

Рисунок 4 — Вязкостно-температурные зависимости, полученные по формулам Вальтера (а), Рейнольдса — Филонова (б), Фогеля — Фулчера — Таммана (в), Рамаяя (д), Френкеля — Эйринга (е, ж), по степенной формуле кинематической вязкости (з) и динамической вязкости (з) для масла ТН-98

Таблица 4 – Формулы описания вязкостно-температурных зависимостей масел ТН-600, МС-8П и ТН-98

Наименование формулы	Написание формулы		
	ТН-600	МС-8П	ТН-98
Формула Вальтера	$v = \exp\left(\frac{2393,275}{T^{1,0967}}\right)$	$v = \exp\left(\frac{2551,917}{T^{1,1222}}\right)$	$v = \exp\left(\frac{1252,379}{T^{0,9769}}\right)$
Формула Рейнольдса – Филонова	$v = \exp(8,1585 - 0,012T)$	$v = \exp(7,7604 - 0,0118T)$	$v = \exp(8,2499 - 0,0116T)$
Формула Фогеля – Фулчера – Таммана	$v = \exp\left(\frac{618,52}{T-125} + 1,0763\right)$	$v = \exp\left(\frac{424,24}{T-155} + 1,887\right)$	$v = \exp\left(\frac{603,58}{T-125} + 1,4003\right)$
Степенная формула (для случая кинематической вязкости)	$v = \frac{465096}{(T-200)^{1,835}}$	$v = \frac{8615,343}{(T-200)^{1,887}}$	$v = \frac{20318,76}{(T-200)^{1,2577}}$
Формула Рамайя	$\mu = e^{\left(\frac{453,3}{T} + 0,6247\right)^2}$	$\mu = e^{\left(\frac{419,46}{T} + 0,604\right)^2}$	$\mu = e^{\left(\frac{403,19}{T} + 0,8173\right)^2}$
Формула Френкеля – Эйринга	$\mu = 0,265431 \cdot e^{\frac{14681}{8,314T}}$	$\mu = 0,319787 \cdot e^{\frac{12871}{8,314T}}$	$\mu = 0,492973 \cdot e^{\frac{13444}{8,314T}}$
Формула Бачинского *	$\mu = \frac{1}{\frac{390,04}{\rho} - 0,4209}$	$\mu = \frac{1}{\frac{555,45}{\rho} - 0,6756}$	$\mu = \frac{1}{\frac{277,5}{\rho} - 0,3072}$
Степенная формула (для случая динамической вязкости)	$\mu = \frac{14969,95}{(T-250)^{1,2936}}$	$\mu = \frac{20985,77}{(T-230)^{1,4047}}$	$\mu = \frac{20594,93}{(T-240)^{1,3009}}$

* формула Бачинского также описывает влияние температуры на вязкость, так как плотность масла в данном исследовании рассматривается как функция от температуры

Таблица 5 – Значения относительных СКО

Наименование формулы	Относительное СКО		
	ТН-600	МС-8П	ТН-98
Формула Вальтера	0,032660835	0,048240	0,080532
Формула Рейнольдса – Филонова	0,076348056	0,097821	0,106896
Формула Фогеля – Фулчера – Таммана	0,026232982	0,018743	0,062853
Степенная формула (для случая кинематической вязкости)	0,024322230	0,024619	0,015748
Формула Рамайя	0,048024321	0,022375	0,032308
Формула Френкеля – Эйринга	0,064593814	0,037392	0,043969
Формула Бачинского	0,150646548	0,066998	0,062824
Степенная формула (для случая динамической вязкости)	0,019738460	0,017035	0,019631

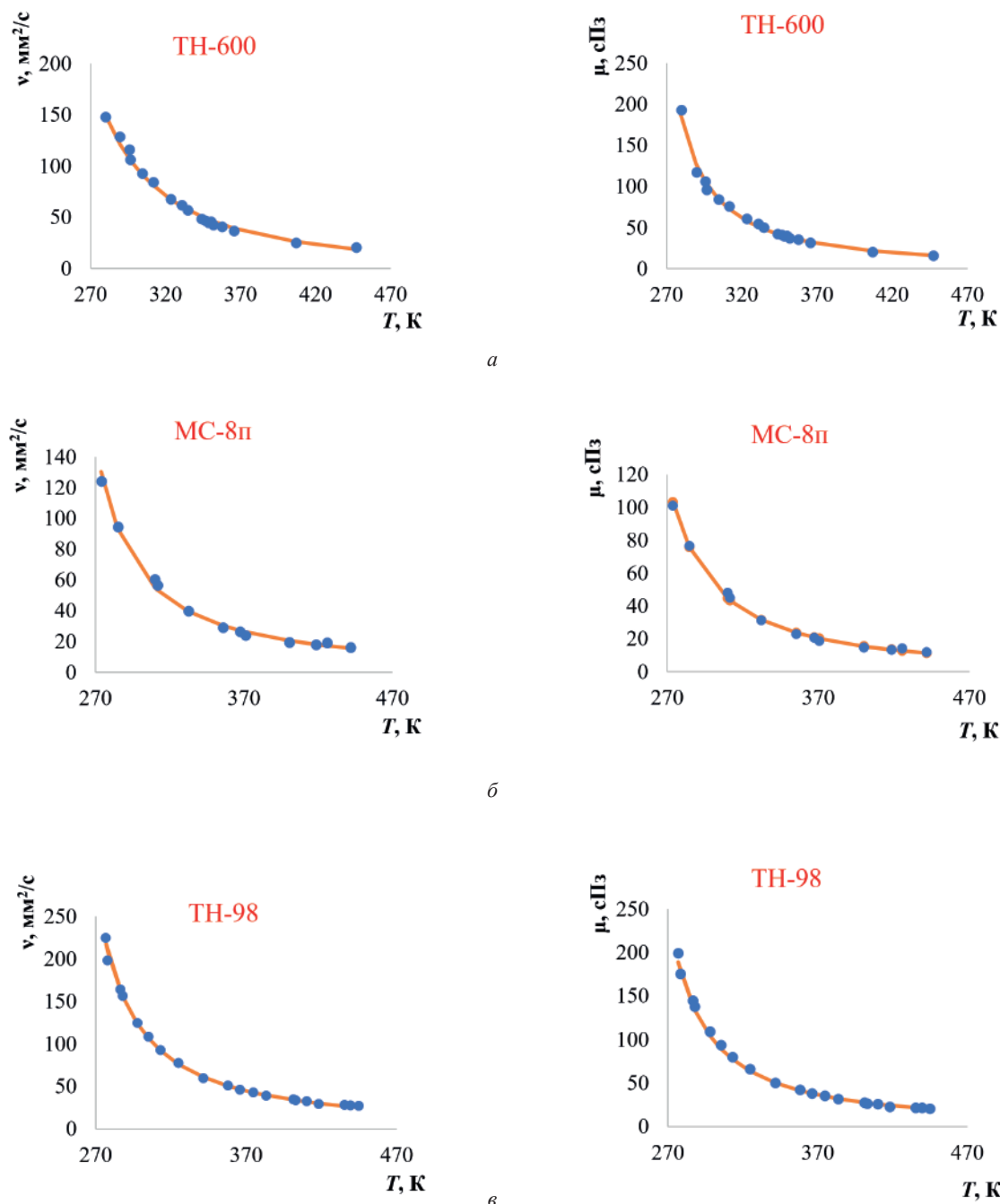


Рисунок 5 — Зависимости кинематической (а) и динамической (б) вязкости масел от температуры

Из графиков видно, что предложенная авторами степенная формула достаточно точно описывает вязкостно-температурные характеристики рассматриваемых масел в интервале исследуемых температур, что подтверждается данными таблицы 5.

Таким образом, предлагаемое степенное уравнение позволяет в целом более точно описать вязкостно-температурные характеристики авиационных масел TH-600, MC-8П и TH-98, чем большинство рассматриваемых в работе формул.

Следует учесть, что адекватное описание вязкостно-температурных характеристик зачастую огра-

ничено определенным температурным интервалом, в связи с чем авторами было исследовано влияние температур на вязкость авиационных масел в пределах от 274 К до 447 К.

Полученные результаты могут быть использованы при расчетах влияния температур на динамическую и кинематическую вязкость масел и прогнозирования их эксплуатационных свойств в рассматриваемом температурном интервале.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Авиация: Энциклопедия / Гл. ред. Г. П. Свищев. – М. : Большая Российская Энциклопедия, 1994. – 736 с.
2. Авиационные правила «Обеспечение гражданской авиации авиационными горючесмазочными материалами и специальными жидкостями», утв. Пост. Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь 18.03.2019 № 14. – 194 с.
3. Новиков, Д. К. Опоры и уплотнения авиационных двигателей и энергетических установок: электр. учеб. пособие / Д. К. Новиков, С. В. Факлеев. – Самара : Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 124 с.
4. Тугунов, П. И. Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации нефтебаз и нефтепроводов / П. И. Тугунов, В. Ф. Новоселов. – М. : Недра, 1981. – 154 с.
5. Аралов, О. В. Исследование методов расчета кинематической вязкости нефти в магистральном нефтепроводе / О. В. Аралов, [и др.] // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2017. Т. 7. № 5 – С. 97–105.
6. Черников, А. В. О вязкостно-температурной зависимости Филонова – Рейнольдса / А. В. Черников // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2010. – № 6 (22). – С. 35–37.
7. Фролов, К. Д. Гидравлический расчет трубопроводов при неизотермическом течении нефтей и нефтепродуктов / К. Д. Фролов // Нефтяное хозяйство. – 1967. – № 4. – С. 58–64.
8. Свиридов, В. П. О значениях постоянных в уравнениях вязкостно-температурной зависимости некоторых смазочных масел / В. П. Свиридов, А. Н. Левенцов // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – 1969. – № 6. – С. 129–136.
9. Черников, А. В. К определению показателя крутизны вискограммы нефтей и нефтепродуктов / А. В. Черников // Трубопроводный транспорт: теория и практика. – 2010. – № 5 (21). – С. 111–115.
10. Стрюк, И. С. Выбор уравнения вязкостно-температурной зависимости для гидравлического расчета горячих трубопроводов / И. С. Стрюк, А. Д. Фатьянов, В. И. Шарапов // Нефтяное хозяйство. – 1965. – № 4. – С. 58–60.
11. Кусаков, М. М. Методы определения физико-химических характеристик нефтяных продуктов / М. М. Кусаков. – М. : ОНТИ, 1936. – 743 с.
12. Стрюк, И. С. Исследование теплового и гидравлического режимов теплоизолированных трубопроводов / И. С. Стрюк, В. И. Черников // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – 1964. – № 7. – С. 3–6.
13. Свиридов, В. П. Расчетные уравнения вязкостно-температурной зависимости мазутов / В. П. Свиридов, А. Н. Левенцов, А. И. Шапилов // Труды НИИ-транснефть. – 1970. – № 7. – С. 152–160.
14. Стрюк, И. С. Исследование движения вязкой жидкости по трубам при неизотермическом режиме : дис. ... канд. техн. наук. – М., 1968. – 147 л.
15. Фукс, Г. И. Вязкость и пластичность нефтепродуктов. / Г. И. Фукс. – М. : Гостоптехиздат, 1951. – 271 с.
16. Рыбак, Б. М. Анализ нефти и нефтепродуктов. / Б. М. Рыбак. – М. : Гостоптехиздат, 1962. – 888 с.
17. Воларович, М. П. Приложение формулы А. И. Бачинского для вязкости расплавленных солей при высоких температурах / М. П. Воларович // Известия Академии наук СССР. VII серия. Отделение математических и естественных наук. – 1933, выпуск 10. – 1431–1437.

REFERENCES

1. Aviation: Encyclopedia / Chief editor G. P. Svishchev. – M. : Great Russian Encyclopedia, 1994. – 736 p.
2. Aviation rules "Provision of civil aviation with aviation fuels and lubricants and special liquids", approved. Fast. Ministry of Transport and Communications of the Republic of Belarus 18.03.2019 No. 14. – 194 p.
3. Novikov, D. K. Supports and seals for aircraft engines and power plants: electr. textbook allowance / D. K. Novikov, S. V. Fakleev. – Samara: Itd-vo Samar. state aerocosm, un-ta, 2011. – 124 p.
4. Tugunov, P. I. Typical calculations for the design and operation of tank farms and oil pipelines / P. I. Tugunov, V. F. Novoselov. – M. : Nedra, 1981. – 154 p.
5. Aralov, O. V. Study of methods for calculating the kinematic viscosity of oil in the main oil pipeline / O. V. Aralov, I. V. Buyanov, A. S. Savanin, and E. I. Iordanskii // Science and technology of pipeline transportation of oil and oil products, 2017. – V. 7, № 5. – P. 97–105.
6. Chernikin, A. V. On the viscosity-temperature dependence of Filonov – Reynolds / A. V. Chernikin // Pipeline transport: theory and practice. – 2010. – No. 6 (22). – P. 35–37.
7. Frolov, K. D. Hydraulic calculation of pipelines for non-isothermal flow of oils and oil products / K. D. Frolov // Oil industry. – 1967. – No. 4. – P. 58–64.
8. Sviridov, V. P. On the values of constants in the equations of viscosity-temperature dependence of some lubricating oils / V. P. Sviridov, A. N. Leventsov // Transport and storage of oil and oil products. – 1969. – No. 6. – P. 129–136.
9. Chernikin, A. V. On the definition of the slope index of the viscogram of oils and oil products / A. V. Chernikin // Pipeline transport: theory and practice. – 2010. – No. 5 (21). – P. 111–115.
10. Stryuk, I. S. Choice of the equation of viscosity-temperature dependence for hydraulic calculation of hot pipelines / I. S. Stryuk, A. D. Fatyanov, V. I. Sharapov // Oil industry. – 1965. – No. 4. – P. 58–60.
11. Kusakov, M. M. Methods for determining the physical and chemical characteristics of petroleum products: monograph / M. M. Kusakov. – M. : ONTI, 1936. – 743 p.
12. Stryuk, I. S. Study of thermal and hydraulic regimes of heat-insulated pipelines / I. S. Stryuk, V. I. Chernikin // Transport and storage of oil and oil products. – 1964. – No. 7. – P. 3–6.
13. Sviridov, V. P. Calculation equations for the viscosity-temperature dependence of fuel oils / V. P. Sviridov, A. N. Leventsov, A. I. Shapilov // Proceedings of NIITransneft. – 1970. – No. 7. – P. 152–160.
14. Stryuk, I. S. Investigation of the motion of a viscous fluid through pipes in a non-isothermal regime: dis. ... cand. tech. Sciences. – M., 1968. – 147 p.
15. Fuchs, G. I. Viscosity and plasticity of petroleum products / G. I. Fuchs. – M. : Gostoptekhizdat, 1951. – 271 p.
16. Rybak, B. M. Analysis of oil and oil products. / B. M. Rybak. – M. : Gostoptekhizdat, 1962. – 888 p.
17. Volarovich, M. P. Application of A.I. Bachinsky's formula for the viscosity of molten salts at high temperatures / M. P. Volarovich // Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. VII series. Department of Mathematical and Natural Sciences. – 1933, vol. 10. – P. 1431–1437.

Статья поступила в редакцию
20.03.2023

ФОРМАЛИЗОВАННЫЕ УРАВНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ ЯВНОПОЛЮСНОЙ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ В СИСТЕМЕ ФАЗНЫХ КООРДИНАТ

Капустин Александр Григорьевич – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры естественнонаучных и общепрофессиональных дисциплин учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
kapustin2649@mail.ru

Alexander Kapustin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Natural Science and General Professional Disciplines of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
kapustin2649@mail.ru

Махов Алексей Викторович – магистрант учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
mav091998@gmail.com

Alexei Makhov – Master's Degree Student of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
mav091998@gmail.com

Аннотация: представлен формализованный вывод уравнений электромагнитных процессов в явнополусной синхронной машине относительно системы фазных координат статора с учетом параметров машины по продольной и поперечной осям ротора. Вывод уравнений основан на использовании двухкоординатной модели многофазной синхронной машины и результирующих векторов токов, напряжений и потокоцеплений многофазной обмотки. Приведены результаты имитационного моделирования режимов работы электрической машины с использованием формализованных уравнений.

Ключевые слова: электрическая машина, ротор, обмотка, уравнения электромагнитных процессов, параметры машины.

Abstract: the paper presents a formalized derivation of the equations of electromagnetic processes in an explicitly pole synchronous machine with respect to the stator phase coordinate system, taking into account the machine parameters along the longitudinal and transverse rotor axes. The derivation of the equations is based on the use of two-coordinate model of multiphase synchronous machine and the resulting vectors of currents, voltages and interlinkages of multiphase winding. The results of simulation modeling of electrical machine operation modes using formalized equations are presented.

Keywords: electric machine, rotor, winding, equations, equations of electromagnetic processes, machine parameters.

Введение

Для исследования переходных процессов в явнополусных синхронных электрических машинах (СЭМ) применяется, либо метод двух реакций Горева – Парка (для симметричных режимов работы) [1, 2], либо метод вращающихся полей (для несимметричных режимов работы) [3].

Использование этих методов для исследования переходных процессов в современных электрических машинах не всегда приводит к желаемому упрощению решаемой задачи, особенно, если исследованию подлежат многовентильные машины [4]. Получаемые в этом случае уравнения переходных процессов в вентильной машине, в дальнейшем подвергаются численному интегрированию [5] по интервалам дискретности работы вентильного звена. При этом на каждом из шагов интегрирования производятся многократные преобразования компонент этих уравнений: сначала от физических (фазных) величин к фиктивным расчетным величинам, а затем, после выполнения вычислительных операций, обрат-

но к фазным. Естественно, что эти преобразования выполнимы лишь при использовании ЭВМ. Но даже и в этом случае трудозатраты на программирование и отладку моделирования такой задачи на ЭВМ превышают затраты, связанные с решением задачи непосредственно в фазных координатах. Кроме того, при описании переходных процессов в системе фазных координат имеются определенные трудности, связанные, прежде всего с тем, что, параметры СЭМ задаются применительно к традиционным методам исследования, то есть в виде состав-

ной задачи, особенно, если исследованию подлежат многовентильные машины [4]. Получаемые в этом случае уравнения переходных процессов в вентильной машине, в дальнейшем подвергаются численному интегрированию [5] по интервалам дискретности работы вентильного звена. При этом на каждом из шагов интегрирования производятся многократные преобразования компонент этих уравнений: сначала от физических (фазных) величин к фиктивным расчетным величинам, а затем, после выполнения вычислительных операций, обрат-

ляющих прямой, обратной и нулевой последовательностей.

В настоящей работе представлено формализованное описание переходных процессов в СЭМ в системе фазных координат статора с учетом параметров машины по продольной и поперечной осям явнополюсного ротора для упрощения исследования переходных процессов в явнополюсных синхронных электрических машинах.

Формализованная математическая модель синхронной электрической машины

Для разработки математической модели СЭМ в системе фазных координат использовались понятия результирующих векторов токов, напряжений и потокоцеплений многофазных обмоток [6] и базовой двухкоординатной модели синхронной электрической машины [2, 7].

На рисунке 1, а схематически представлена двухкоординатная модель СЭМ с обмотками А и В, расположенными ортогонально на статоре. Магнитные оси d и q явнополюсного ротора смещены на произвольный угол θ относительно магнитных осей α и β обмоток статора. В этом случае результирующий вектор тока обмоток статора записан через его проекции в виде:

$$\vec{i}_S = \vec{i}_\alpha + j\beta = \vec{i}_A + \alpha' \vec{i}_B, \quad (1)$$

где $\alpha' = e^{j\frac{\pi}{2}}$ — оператор поворота векторов.

В координатах ротора вектор $\vec{i}_S$ равен

$$\vec{i}_S^\omega = \vec{i}_S \cdot e^{-j\theta} = \vec{i}_d + j\vec{i}_q, \quad (2)$$

где $\vec{i}_d$ и $\vec{i}_q$ — проекции вектора $\vec{i}_S^\omega$ на координатные оси ротора.

Величина этих проекций равна:

$$\begin{aligned} \vec{i}_d &= \text{Re}[\vec{i}_S^\omega] = \vec{i}_A \cos \theta + \vec{i}_B \sin \theta; \\ \vec{i}_q &= \text{Im}[\vec{i}_S^\omega] = \vec{i}_A \sin \theta + \vec{i}_B \cos \theta. \end{aligned} \quad (3)$$

Под действием токов (3) потокоцепления по осям d и q ротора определяются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \vec{\Psi}_d &= \text{Re}[\vec{i}_S^\omega] \cdot L_d; \\ \vec{\Psi}_q &= \text{Im}[\vec{i}_S^\omega] \cdot L_q, \end{aligned} \quad (4)$$

где L_d и L_q — собственные индуктивности воображаемых обмоток ротора по осям d и q .

Тогда результирующий вектор потокоцепления обмоток статора в координатах ротора может быть записан в виде

$$\vec{\Psi}_S^\omega = \vec{\Psi}_d + j\vec{\Psi}_q, \quad (5)$$

где $\vec{\Psi}_d$ и $\vec{\Psi}_q$ — потокоцепления обмоток двухкоординатной модели, расположенных на роторе по осям d и q .

Используя (5), результирующий вектор потокоцеплений обмоток статора в координатах ротора будет равен:

$$\vec{\Psi}_S = \vec{\Psi}_S^\omega \cdot e^{j\theta}. \quad (6)$$

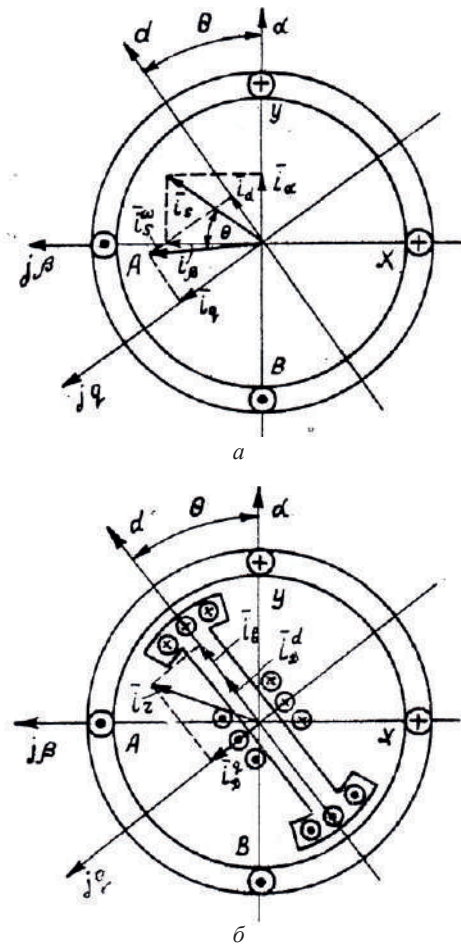


Рисунок 1 — Системы векторов двухкоординатной модели синхронной машины

Откуда искомые потокоцепления фазных обмоток статора, выраженные через параметры машины по продольной и поперечной осям ротора, могут быть найдены как:

$$\vec{\Psi}_A = \text{Re}[\vec{\Psi}_S]; \quad \vec{\Psi}_B = \text{Im}[\vec{\Psi}_S]. \quad (7)$$

Или в развернутом виде:

$$\begin{aligned} \vec{\Psi}_A &= \frac{L_d + L_q}{2} \cdot \vec{i}_A + \frac{L_d - L_q}{2} \vec{i}_A \cos 2\theta + \frac{L_d - L_q}{2} \vec{i}_B \sin 2\theta = \\ &= (L_{cp} + L_{\sim} \cos 2\theta) \cdot \vec{i}_A + L_{\sim} \vec{i}_B \sin 2\theta = L_A \cdot \vec{i}_A + L_{AB} \cdot \vec{i}_B; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \vec{\Psi}_B &= \frac{L_d + L_q}{2} \cdot \vec{i}_B - \frac{L_d - L_q}{2} \vec{i}_B \cos 2\theta + \frac{L_d - L_q}{2} \vec{i}_A \sin 2\theta = \\ &= (L_{cp} - L_{\sim} \cos 2\theta) \cdot \vec{i}_B + L_{\sim} \vec{i}_A \sin 2\theta = L_B \cdot \vec{i}_B + L_{BA} \cdot \vec{i}_A. \end{aligned} \quad (9)$$

где $L_A = L_{cp} + L_{\sim} \cos 2\theta$ — собственная индуктивность обмотки фазы А статора;

$L_B = L_{cp} - L_{\sim} \cos 2\theta$ — собственная индуктивность обмотки фазы В статора;

$L_{cp} = \frac{L_d + L_q}{2}$ — среднее, не зависящее от положения ротора, значение собственной индуктивности фазной обмотки статора;

$L_{\omega} = \frac{L_d - L_q}{2}$ — переменная составляющая собственной индуктивности фазной обмотки статора, изменяемая в зависимости от пространственного положения ротора;

$L_{AB} = L_{BA} = L_{\omega} \cdot \sin 2\theta$ — взаимная индуктивность фазных обмоток статора.

В реальной синхронной машине на роторе обычно размещены две обмотки: обмотка возбуждения и демпферная. Причем, в соответствии с расположением обмоток на роторе, вектор тока обмотки возбуждения $\vec{i}_B$ совпадает с продольной осью полюсов (рисунок 1, б) и не имеет своей составляющей по ортогональной оси $j\vec{q}$. Полная же демпферная обмотка размещается обычно по окружности ротора в полюсных наконечниках и в верхнем слое немагнитного наполнителя между полюсами и поэтому токи в ней могут быть представлены в виде суммы составляющих по осям d и q ротора.

С учетом этого результирующий вектор тока обмоток ротора записан в виде:

$$\vec{i}_r = \vec{i}_d' + j\vec{i}_q' = \vec{i}_B + \vec{i}_D' + a'\vec{i}_D^q = \vec{i}_B + \vec{i}_D + \alpha'\vec{i}_Q, \quad (10)$$

где $\vec{i}_D^d = \vec{i}_D$ — продольная составляющая тока демпферной обмотки;

$\vec{i}_D^q = \vec{i}_Q$ — поперечная составляющая тока демпферной обмотки.

Потокосцепления, создаваемые токами (10) по осям d и q , будут равны:

$$\begin{aligned} \vec{\Psi}_d' &= L_B \cdot \vec{i}_B + L_D \cdot \vec{i}_D; \\ \vec{\Psi}_q' &= L_Q \cdot \vec{i}_Q, \end{aligned} \quad (11)$$

где L_B — собственная индуктивность обмотки возбуждения;

L_D, L_Q — составляющие собственной индуктивности демпферной обмотки, отнесенные к осям d и q ротора.

При неполной демпферной обмотке в (11) необходимо ввести коэффициенты пропорциональности, вычисляемые по методике приведения обмоток [4–7].

В соответствии с (11), результирующий вектор потокоосцеплений ротора равен

$$\vec{\Psi}_r = \vec{\Psi}_d' + j\vec{\Psi}_q' = (L_B \cdot \vec{i}_B + L_D \cdot \vec{i}_D) + jL_Q \cdot \vec{i}_Q. \quad (12)$$

В координатах статора результирующий вектор потокоосцеплений ротора с учетом (12) может быть записан в виде

$$\vec{\Psi}_r^s = \vec{\Psi}_r \cdot e^{j\theta}. \quad (13)$$

Откуда составляющие потокоосцеплений ротора, сцепляемые с обмотками статора, соответственно равны:

$$\vec{\Psi}_{Ar} = \text{Re}[\vec{\Psi}_r^s]; \quad (14)$$

$$\vec{\Psi}_r^s = \vec{\Psi}_r \cdot e^{j\theta}. \quad (15)$$

Учитывая равенства (7)–(9) и (14), (15), полные потокоосцепления обмоток статора могут быть записаны в виде:

$$\vec{\Psi}_{AS} = \text{Re}[\vec{\Psi}_S] + \text{Re}[\vec{\Psi}_r^s], \quad (16)$$

$$\vec{\Psi}_r = \vec{\Psi}_d' + j\vec{\Psi}_q' = (L_B \cdot \vec{i}_B + L_D \cdot \vec{i}_D) + jL_Q \cdot \vec{i}_Q. \quad (17)$$

Или в развернутом виде:

$$\begin{aligned} \vec{\Psi}_{AS} &= (L_{cp} + L_{\omega} \cos 2\theta) \cdot \vec{i}_A + L_{\omega} \sin 2\theta \cdot \vec{i}_B + L_B \cdot \vec{i}_B \cos \theta + \\ &+ L_D \vec{i}_D \cos \theta - L_Q \vec{i}_Q \sin \theta; \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \vec{\Psi}_{BS} &= (L_{cp} - L_{\omega} \cos 2\theta) \cdot \vec{i}_B + L_{\omega} \vec{i}_A \sin 2\theta + L_B \vec{i}_B \sin \theta + \\ &+ L_D \vec{i}_D \sin \theta + L_Q \vec{i}_Q \cos \theta. \end{aligned} \quad (19)$$

Магнитные потоки обмоток статора взаимодействуют с магнитными потоками обмоток ротора и изменяют их результирующие потокоосцепления. Количественно полные потокоосцепления обмоток ротора могут быть учтены суммированием равенств (5) и (12).

В итоге получим результирующий вектор полных потокоосцеплений обмоток ротора

$$\vec{\Psi}_{rr} = \vec{\Psi}_r + \vec{\Psi}_S^{\omega}. \quad (20)$$

Откуда полные потокоосцепления обмоток ротора по продольной и поперечной осям равны:

$$\vec{\Psi}_{rd} = \text{Re}[\vec{\Psi}_{rr}]; \quad (21)$$

$$\vec{\Psi}_{rq} = \text{Im}[\vec{\Psi}_{rr}]. \quad (22)$$

В соответствии с (21) и (22) полные потокоосцепления обмоток, расположенных на роторе, будут записаны в виде

$$\vec{\Psi}_B = L_d \vec{i}_A \cos \theta + L_d \vec{i}_B \sin \theta + L_B \cdot \vec{i}_B + L_{BD} \cdot \vec{i}_D; \quad (23)$$

$$\vec{\Psi}_D = L_d \vec{i}_A \cos \theta + L_d \vec{i}_B \sin \theta + L_{BD} \cdot \vec{i}_B + L_D \cdot \vec{i}_D; \quad (24)$$

$$\vec{\Psi}_Q = -L_q \vec{i}_A \sin \theta + L_q \vec{i}_B \cos \theta + L_Q \cdot \vec{i}_Q, \quad (25)$$

где L_{BD} — взаимная индуктивность обмоток возбуждения и демпферной по продольной оси.

Равенства (18), (19) и (23)–(25), полученные путем чисто формальных действий над векторами, совпадают с соответствующими выражениями работ [5–7], где они получены в результате графических построений и анализа векторных диаграмм.

Обобщенные векторные уравнения многофазных синхронных электрических машин

К двухкоординатной модели могут быть приведены любые СЭМ, содержащие произвольное число обмоток как на статоре, так и на роторе [2]. Следовательно, для любых СЭМ токи, напряжения и потокоосцепления обмоток с помощью результирующих векторов могут быть записаны в фазных координатах статора через параметры машины по продольной и поперечной осям ротора. В общем виде результирующие векторы токов, напряжений и потокоосцеплений многофазных СЭМ могут быть записаны следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \vec{i}_S &= N_{dS} \sum_{K=1}^{h_S} \vec{i}_{KS} \cdot \alpha^{K-1} \\ \vec{U}_S &= N_{dS} \sum_{K=1}^{h_S} \vec{U}_{KS} \cdot \alpha^{K-1} \\ \vec{\Psi}_S &= N_{dS} \sum_{K=1}^{h_S} \vec{\Psi}_{KS} \cdot \alpha^{K-1} \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{i}_r &= N_{dr} \sum_{K=1}^{h_r} \bar{i}_{Kr} \cdot \alpha^{K-1} \\ \bar{U}_r &= N_{dr} \sum_{K=1}^{h_r} \bar{U}_{Kr} \cdot \alpha^{K-1} \\ \bar{\Psi}_r &= N_{dr} \sum_{K=1}^{h_r} \bar{\Psi}_{Kr} \cdot \alpha^{K-1} \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

где $\alpha = e^{j\frac{2\pi}{h}}$ — оператор поворота векторов;
 h — общее число фазных обмоток (h_s — статора, h_r — ротора);

$N_{ds} = \frac{1}{W_s}$, $N_{dr} = \frac{1}{W_r}$ — коэффициенты, характеризующие отношение числа витков фазных обмоток синхронной машины к числу витков воображаемых обмоток двухкоординатной модели [2];

K — порядковый номер обмотки (KS — статора, Kr — ротора).

По известным составляющим результирующих векторов (26) и (27) двухкоординатной модели СЭМ определяются искомые фазные токи, напряжения и потокосцепления любой многофазной СЭМ.

Полагая, что в любой момент времени сумма мгновенных значений фазных токов для синхронной машины без нулевого провода равна нулю, получим:

$$\bar{i}_{KS} = Re[\bar{i}_s \cdot \alpha^{-(K-1)}] = Re\left[\alpha^{-(K-1)} \cdot N_{ds} \sum_{K=1}^{h_s} \bar{i}_{KS} \cdot \alpha^{(K-1)}\right]; \quad (28)$$

$$\bar{i}_{Kr} = Re[\bar{i}_r \cdot \alpha^{-(K-1)}] = Re\left[\alpha^{-(K-1)} \cdot N_{dr} \sum_{K=1}^{h_r} \bar{i}_{Kr} \cdot \alpha^{(K-1)}\right]; \quad (29)$$

$$\bar{U}_{KS} = Re[\bar{U}_s \cdot \alpha^{-(K-1)}] = Re\left[\alpha^{-(K-1)} \cdot N_{ds} \sum_{K=1}^{h_s} \bar{U}_{KS} \cdot \alpha^{(K-1)}\right]; \quad (30)$$

$$\bar{U}_{Kr} = Re[\bar{U}_r \cdot \alpha^{-(K-1)}] = Re\left[\alpha^{-(K-1)} \cdot N_{dr} \sum_{K=1}^{h_r} \bar{U}_{Kr} \cdot \alpha^{(K-1)}\right]; \quad (31)$$

$$\bar{\Psi}_{KS} = Re[\bar{\Psi}_s \cdot \alpha^{-(K-1)}] = Re\left[\alpha^{-(K-1)} \cdot N_{ds} \sum_{K=1}^{h_s} \bar{\Psi}_{KS} \cdot \alpha^{(K-1)}\right]; \quad (32)$$

$$\bar{\Psi}_{Kr} = Re[\bar{\Psi}_r \cdot \alpha^{-(K-1)}] = Re\left[\alpha^{-(K-1)} \cdot N_{dr} \sum_{K=1}^{h_r} \bar{\Psi}_{Kr} \cdot \alpha^{(K-1)}\right]. \quad (33)$$

Тождественность соотношений (28) – (33) нетрудно доказать на конкретном примере для синхронных машин с $h \geq 3$.

В случае исследования СЭМ с нулевым проводом необходимо в правой части равенств (28) и (29) учесть нулевые составляющие, полученные из выражения

$$\bar{i}_0 = \frac{1}{h} \sum_{K=1}^h \bar{i}_K.$$

Подставляя в правые части равенств (28) – (33) значение результирующих векторов через их составляющие в двухкоординатной модели, получим:

$$\bar{i}_{KS} = Re[(\bar{i}_{AS} + j\bar{i}_{BS}) \cdot \alpha^{-(K-1)}] = \bar{i}_{AS} \cos \frac{2\pi(K-1)}{h_s} + \bar{i}_{BS} \sin \frac{2\pi(K-1)}{h_s}; \quad (34)$$

$$\bar{i}_{Kr} = Re[(\bar{i}_{Ar} + j\bar{i}_{Br}) \cdot \alpha^{-(K-1)}] = \bar{i}_{Ar} \cos \frac{2\pi(K-1)}{h_r} + \bar{i}_{Br} \sin \frac{2\pi(K-1)}{h_r}; \quad (35)$$

$$\bar{U}_{KS} = Re[(\bar{U}_{AS} + j\bar{U}_{BS}) \cdot \alpha^{-(K-1)}] = \bar{U}_{AS} \cos \frac{2\pi(K-1)}{h_s} + \bar{U}_{BS} \sin \frac{2\pi(K-1)}{h_s}; \quad (36)$$

$$\bar{U}_{Kr} = Re[(\bar{U}_{Ar} + j\bar{U}_{Br}) \cdot \alpha^{-(K-1)}] = \bar{U}_{Ar} \cos \frac{2\pi(K-1)}{h_r} + \bar{U}_{Br} \sin \frac{2\pi(K-1)}{h_r}; \quad (37)$$

$$\bar{\Psi}_{KS} = Re[(\bar{\Psi}_{AS} + j\bar{\Psi}_{BS}) \cdot \alpha^{-(K-1)}] = \bar{\Psi}_{AS} \cos \frac{2\pi(K-1)}{h_s} + \bar{\Psi}_{BS} \sin \frac{2\pi(K-1)}{h_s}; \quad (38)$$

$$\bar{\Psi}_{Kr} = Re[(\bar{\Psi}_{Ar} + j\bar{\Psi}_{Br}) \cdot \alpha^{-(K-1)}] = \bar{\Psi}_{Ar} \cos \frac{2\pi(K-1)}{h_r} + \bar{\Psi}_{Br} \sin \frac{2\pi(K-1)}{h_r}. \quad (39)$$

Используя равенства (27), (28) и (34) – (39), запишем уравнения для фазных ЭДС синхронной машины в координатах статора, где коэффициенты при переменных будут выражены через параметры машин по продольной и поперечной осям ротора. Тогда уравнения для фазных ЭДС обмоток будут иметь следующий вид:

- для обмоток статора:

$$\begin{aligned} \bar{U}_{KS} &= r_{KS} \cdot Re\left[(\bar{i}_{AS} + j\bar{i}_{BS}) e^{-j\frac{2\pi(K-1)}{h_s}}\right] + \\ &+ \frac{d}{dt} Re\left[(\bar{\Psi}_{AS} + j\bar{\Psi}_{BS}) e^{-j\frac{2\pi(K-1)}{h_s}}\right]; \end{aligned} \quad (40)$$

- для обмоток ротора:

$$\begin{aligned} \bar{U}_{Kr} &= r_{Kr} \cdot Re\left[(\bar{i}_{Ar} + j\bar{i}_{Br}) e^{-j\frac{2\pi(K-1)}{h_r}}\right] + \\ &+ \frac{d}{dt} Re\left[(\bar{\Psi}_{Ar} + j\bar{\Psi}_{Br}) e^{-j\frac{2\pi(K-1)}{h_r}}\right]. \end{aligned} \quad (41)$$

Результаты исследований

Анализ результатов моделирования статических режимов синхронных генераторов показывает, что внешние характеристики, полученные при моделировании с использованием паспортных данных, существенно отличаются от экспериментальной внешней характеристики (рисунки 2, 3).

Анализ графиков показывает, что погрешностимоделирования (превышение напряжения при $\cos\varphi = 1$) для $I = I_n$ составляет 25 %, а для $I = 2I_n$ – 65 %.

Условие максимума напряжения $\frac{dU_\varphi}{dR_n} = 0$ соответствует условию $x_d x_q R_n^2$, что всегда выполняется для рассматриваемой модели с учетом допущений $x_d = \text{const}$ для $I = (1,5 - 2,5)I_n$, $R = 0$, $x_q = \text{const}$.

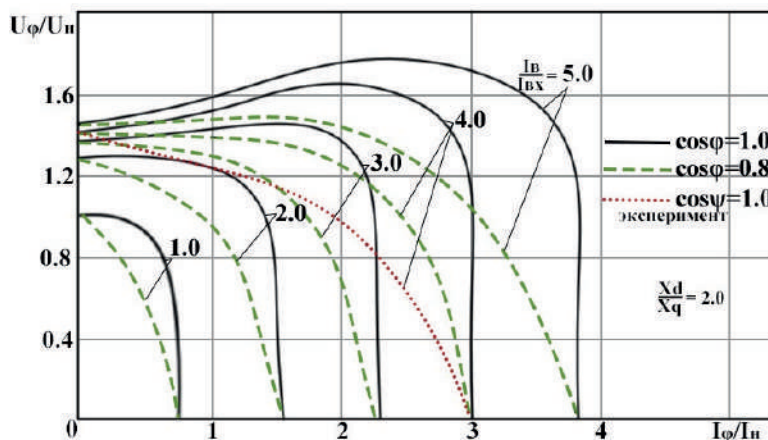


Рисунок 2 — Внешние характеристики генератора при соотношении сопротивлений $x_d/x_q = 2,0$

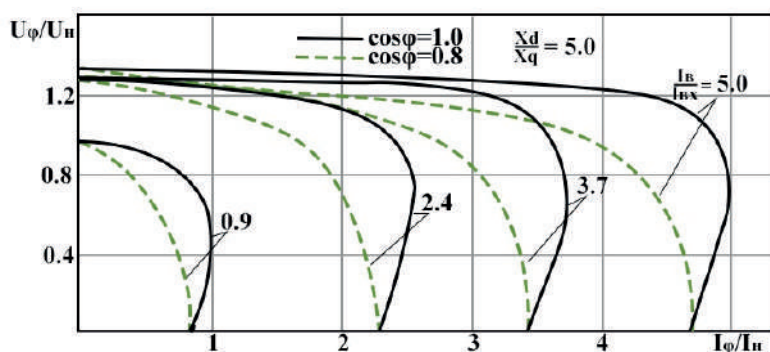


Рисунок 3 — Внешние характеристики генератора при соотношении сопротивлений $x_d/x_q = 5,0$

На графиках внешних характеристик (рисунок 3), в отличие от максимумов напряжений (рисунок 2), имеются максимумы тока нагрузки, что не соответствует экспериментальным данным при $\cos \varphi = 1$. Условия максимума тока $dI_\phi/dR_n = 0$ выполняются лишь при условии $x_q(x_d - 2x_q) = (R - R_n)^2$ только в случае явнополюсных генераторов с неравномерным воздушным зазором ($x_d/x_q = 2-4$). Для неявнополюсных синхронных генераторов ($x_d = x_q$) и явнополюсных генераторов с равномерным воздушным зазором ($x_d/x_q = 1,7-1,9$) это условие не выполняется (рисунок 2).

Внешние характеристики при $\cos \varphi = 0,8$, хотя и не имеют максимумов напряжения и тока, но также не соответствуют экспериментальным зависимостям. Так, на рисунке 2 внешняя характеристика располагается ниже экспериментальной, получаемой при $\cos \varphi = 1$.

Моделирование динамических режимов работы генератора проводилось с целью выявления влияния трансформаторных ЭДС и демпферных контуров на динамические характеристики генератора при изменении возмущений по цепям нагрузки (I_n) и изменении задающих воздействий ($u_{вв}$) в цепи возбуждения. Оценка влияния вышеуказанных факторов на характеристики генератора проводилась путем сравнения данных натурных испытаний и аналогичных данных, полученных путем имитационного

моделирования для полной математической модели и моделей более низкого уровня (без влияния трансформаторных ЭДС и демпферных контуров). Моделирование проводилось в среде Matlab (№ SKR/1843-234) при коммутациях нагрузки от 0 % до 160 % от номинальной мощности генератора и при частоте вращения вала генератора 8000 об/мин. На рисунке 4, а — сплошной линией показаны результаты натурного эксперимента.

Анализ результатов моделирования динамических режимов синхронного генератора (рисунок 4, а–н) показывает, что учет демпферных контуров по обеим осям в уравнениях математической модели генератора оказывает незначительное влияние на протекание переходных электромагнитных процессов лишь на интервале времени, близком к моменту изменения сигналов управления и токов нагрузки. При этом снижаются величины перерегулирований напряжения генератора приблизительно на 1,3 % – 2,0 % по сравнению с натурным экспериментом.

Анализ кривых изменения выходного напряжения генератора при имитационном моделировании с учетом и без учета влияния трансформаторных ЭДС в математической модели генератора показывает, что качественно процессы протекают аналогично (рисунок 4, а–к).

Однако, при учете трансформаторных ЭДС имеют место большие отклонения напряжения при действии возмущений (коммутация токов нагрузки) и измене-

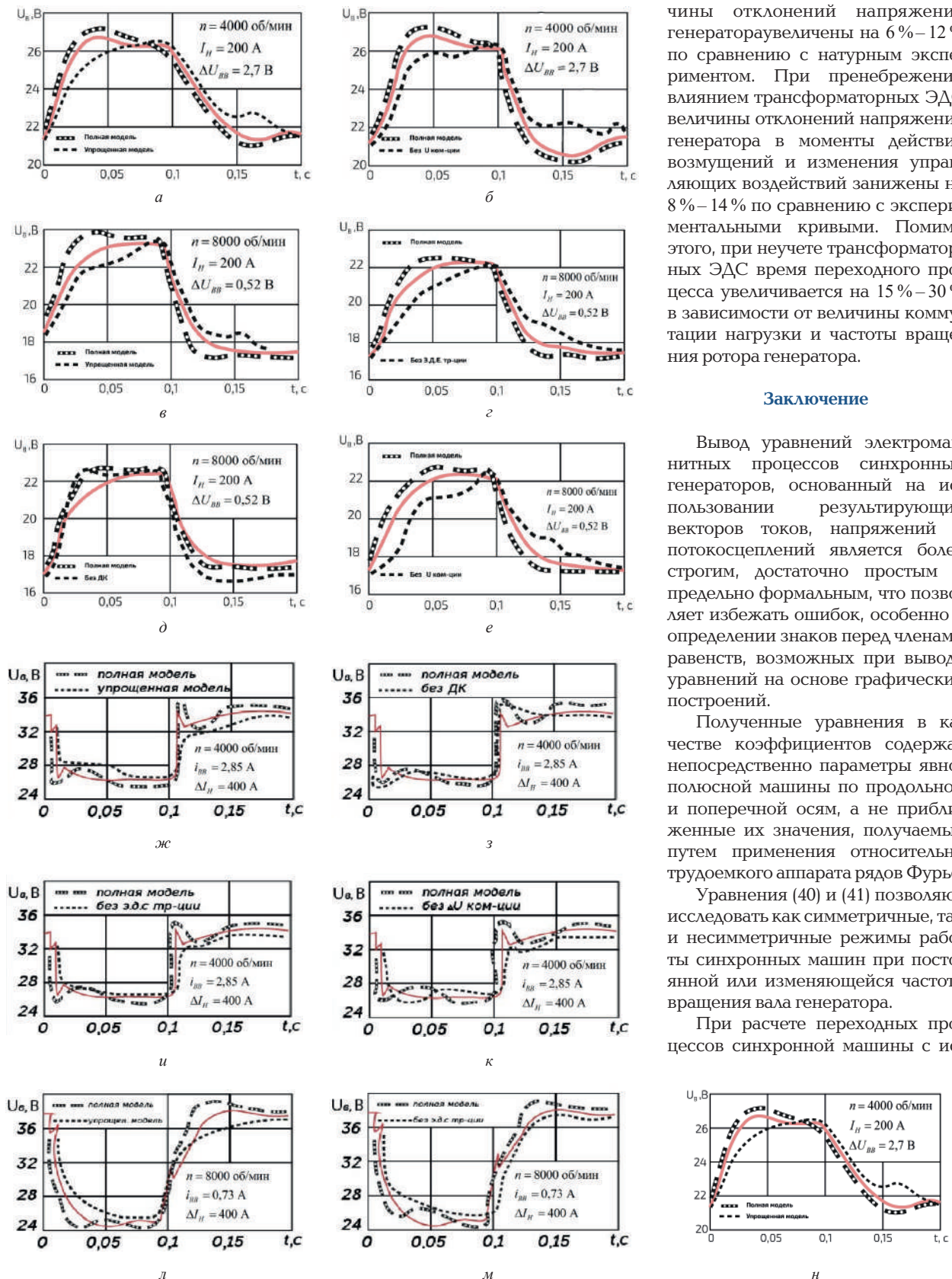


Рисунок 4 — Моделирование динамических режимов синхронного генератора при различных условиях нагрузки и частоты вращения

нии сигнала управления: величины отклонений напряжения генератора увеличены на 6 %–12 % по сравнению с натурным экспериментом. При пренебрежении влиянием трансформаторных ЭДС величины отклонений напряжения генератора в моменты действия возмущений и изменения управляющих воздействий занижены на 8 %–14 % по сравнению с экспериментальными кривыми. Помимо этого, при неучете трансформаторных ЭДС время переходного процесса увеличивается на 15 %–30 % в зависимости от величины коммутации нагрузки и частоты вращения ротора генератора.

Заключение

Вывод уравнений электромагнитных процессов синхронных генераторов, основанный на использовании результирующих векторов токов, напряжений и потокосцеплений является более строгим, достаточно простым и предельно формальным, что позволяет избежать ошибок, особенно в определении знаков перед членами равенств, возможных при выводе уравнений на основе графических построений.

Полученные уравнения в качестве коэффициентов содержат непосредственно параметры явнополюсной машины по продольной и поперечной осям, а не приближенные их значения, получаемые путем применения относительно трудоемкого аппарата рядов Фурье.

Уравнения (40) и (41) позволяют исследовать как симметричные, так и несимметричные режимы работы синхронных машин при постоянной или изменяющейся частоте вращения вала генератора.

При расчете переходных процессов синхронной машины с ис-

пользованием уравнений (40) и (41) объем вычислительных операций на ЭВМ несколько меньше, чем при использовании метода двух реакций или метода симметричных составляющих.

Результаты исследований статических режимов работы синхронных генераторов показывают, что при моделировании работы генераторов в указанных режимах без учета насыщения по поперечной оси q и влияния поперечной реак-

ции якоря на продольную ось d приводят к недопустимым погрешностям, достигающим более 69 % при форсированных по возбуждению статических режимах работы генератора. Погрешность моделирования статических режимов тем больше, чем меньше ток возбуждения генератора i_f .

При исследовании переходных режимов генератора допустимо пренебрегать влиянием демпферных контуров.

Расчеты переходных процессов синхронного генератора целесообразно проводить с учетом влияния трансформаторных ЭДС, так как, в противном случае, при изменении режимов работы генератора перерегулирования напряжения будут увеличены на 5 % – 18 %, а время переходного процесса — на 15 % – 35 % по сравнению с данными натурного эксперимента.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Грузов, Л. И. Методы математического исследования электрических машин / Л. И. Грузов. – М-Л.: Госэнергоиздат, 1953. – 264 с.
2. Лайбль, Т. Теория синхронной машины при переходных процессах / Т. Лайбль. – М-Л.: Госэнергоиздат, 1957. – 250 с.
3. Лутидзе, Ш. И. Основы теории электрических машин с управляемым полупроводниковым коммутатором / Ш. И. Лутидзе. – М.: Наука, 1968. – 303 с.
4. Ковач, К. П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К. П. Ковач, И. Рац. – М-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
5. Страхов, С. В. Переходные процессы в электрических цепях, содержащих машины переменного тока / С. В. Страхов. – М-Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 247 с.
6. Вольдек, А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. – М.: Энергия, 1974. – 840 с.
7. Тафт, В. А. Электрические цепи с периодически изменяющимися параметрами и переходные процессы в синхронных машинах / В. А. Тафт. – М.: Изд. АН СССР, 1958. – 185 с.

REFERENCES

1. Gruzov, L. I. Methods of mathematical research of electrical machines / L. I. Gruzov. – Moscow-Leningrad: State Energy Publishing House, 1953. – 264 p.
2. Laybl', T. Theory of a synchronous machine in transients / T. Laybl'. – Moscow-Leningrad: State Energy Publishing House, 1957. – 250 p.
3. Lutidze, H. I. Fundamentals of the theory of electrical machines with a controlled semiconductor switch / H. I. Lutidze. – Moscow: Science, 1968. – 303 p.
4. Kovach, K. P. Transient processes in AC machines / K. P. Kovach, I. Rac. – Moscow-Leningrad: State Energy Publishing House, 1963. – 744 p.
5. Strahov, S. V. Transient processes in electrical circuits containing AC machines / S. V. Strahov. – Moscow-Leningrad: State Energy Publishing House, 1960. – 247 p.
6. Vol'dek, A. I. Electric machines / A. I. Vol'dek. – Moscow: Energy, 1974. – 840 p.
7. Taft, V. A. Electrical circuits with periodically changing parameters and transient processes in synchronous machines / V. A. Taft. – Moscow: Ed. USSR Academy of Sciences, 1958. – 185 p.

*Статья поступила в редакцию
27.03.2023*

НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ КЛАССИФИКАЦИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПО МАТЕРИАЛАМ ОБЪЕКТИВНОГО КОНТРОЛЯ

Коршак Сергей Александрович – кандидат технических наук, военнотехнический специалист учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь», Республика Беларусь
sergey.korshak.92@mail.ru

Sergey Korshak – Candidate of Technical Sciences, Serviceman of Military Academy of the Republic of Belarus, Republic of Belarus
sergey.korshak.92@mail.ru

Аннотация: в работе приведены результаты построения и исследования нейронной сети прямого распространения с временной задержкой входного сигнала, позволяющей классифицировать режимы работы газотурбинного двигателя Р-95Ш при автоматизированном анализе полетных данных самолета Су-25 по материалам объективного контроля.

Ключевые слова: нейронные сети, алгоритм классификации, алгоритм обучения, режимы работы авиационных газотурбинных двигателей, объективный контроль.

Abstract: the paper presents the results of the construction and research of a neural network of direct propagation with a time delay of the input signal, which allows classifying the operating modes of the R-95SH gas turbine engine during automated analysis of flight data of the Su-25 aircraft based on objective control materials.

Keywords: neural networks, classification algorithm, learning algorithm, modes of operation of aviation gas turbine engines, objective control.

Введение

Отказы авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) оказывают немаловажное влияние на техническую безопасность полетов. Статистика аварийности в Государственной авиации Республики Беларусь за последние 10 лет показывает, что причинами более 30 % всех авиационных событий (АС) являются отказы ГТД и их систем [1]. Появление отказов, как правило, является следствием старения парка воздушных судов, а также несоответствия (несовершенства) средств и методов контроля технического состояния применительно к современным условиям эксплуатации.

Предотвращение АС из-за неисправностей ГТД возможно за счет организации мониторинга технического состояния силовых установок воздушных судов при подготовках к полетам и наземном опробовании во время выполнения регламентных работ путем анализа материалов объективного контроля (ОК) (данных о работе двигателя, регистрируемых бортовым устройством регистрации (БУР) полетной информации).

Контроль работоспособности силовой установки, включающей в себя два ГТД, по данным БУР осуществляется следующими способами:

- 1) путем качественного сравнения параметров двух двигателей на одинаковых режимах работы и в одинаковых условиях полета;
- 2) путем проверки соответствия параметров каждого двигателя установленным значениям по технической и эксплуатационной документации при заданных режимах работы и условиях полета.

Оба способа требуют предварительного определения участков записей термогазодинамических параметров, соответствующих отдельным режимам работы ГТД. В настоящее время процесс классификации режимов работы ГТД по материалам ОК, как правило, осуществляется вручную, с участием высококвалифицированных специалистов, длительная и монотонная работа которых, с одной стороны, может привести к ошибкам классификации, а с другой — к значительным временным затратам [2].

Применение математического аппарата нейронных сетей (НС) широко распространено в области автоматизации процессов классификации, в том числе участков временных рядов.

Таким образом, целью работы является, автоматизация процесса классификации режимов работы ГТД по материалам ОК, за счет применения математического аппарата НС. Задача построения и исследования нейросетевой модели для классификации режимов работы ГТД, на примере двигателя Р-95Ш самолета Су-25 приведена в следующей постановке.

Постановка задачи

Объект распознавания O представлен временным рядом, образованным наборами данных, зарегистрированных в БУР, по результатам измерения термогазодинамических параметров ГТД в дискретные моменты времени:

$$O = \overline{X_1}, \overline{X_2}, \dots, \overline{X_t}, \quad (1)$$

где $\bar{X}_i = \{x_1; x_2; \dots; x_n\}$, $i=1 \dots t$ — значения термогазодинамических параметров, зарегистрированных БУР в i -й момент времени;

n — количество входных параметров;

t — время работы ГТД от момента запуска до остановки (протяженность объекта распознавания).

В общем виде задача классификации заключается в отнесении объекта распознавания $O(1)$ к одному из известных классов состояний множества $S = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}$ (режимов работы ГТД).

Решение задачи классификации с помощью нейронной сети (НС) включает в себя следующие этапы:

- определение и предварительная обработка входных данных;
- определение исходного множества классов состояний ГТД S ;
- выбор архитектуры и структуры НС;
- обучение НС;
- оценка эффективности автоматической классификации.

Определение и предварительная обработка входных данных

Каждый участок временного ряда, характеризующий тот или иной режим работы ГТД, описывается характерным изменением определенных термогазодинамических параметров. При этом основным признаком, по которому производится выделение «эталонных» участков при построении обучающей выборки, является положение ручки управления двигателем (РУД).

Перечень входных данных для классификации режимов работы ГТД Р-95Ш самолета Су-25 по материалам ОК сформирован путем анализа их характерных изменений и приведен в таблице 1 [4, с. 158]. При их выборе также учитывалась необходимость введения информационной избыточности.

Перечень входных параметров в совокупности с временной координатой t образуют вектор входных данных $\bar{X}_i = \{x_1; x_2; \dots; x_6\}$, $i=1$.

Предварительная обработка входных данных включает в себя выполнение алгоритма устранения сбойных кадров записей БУР [3, с. 42–45] и нормализацию входных параметров согласно выражению

$$\tilde{x}_i = \frac{x_i - x_{i \min}}{x_{i \max} - x_{i \min}}, \quad (2)$$

где $\tilde{x}_i$ — безразмерная величина входного параметра, находящаяся в диапазоне от 0 до 1;

$x_{i \max}$, $x_{i \min}$ — максимальное и минимальное значения параметра x_i .

Предварительная обработка входных данных позволяет значительно повысить скорость сходимости алгоритма обучения и в свою очередь снизить ошибку обучения НС за счет снижения дополнительного влияния отдельных входных параметров на нейроны сети [5, с. 248].

Определение исходного множества классов состояний газотурбинного двигателя

Множество классов состояний (режимов работы ГТД) для каждого типа воздушного судна и его силовой установки приведено в нормативных документах по технической эксплуатации.

В таблице 2 приведен перечень множества классифицируемых режимов работы $S = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}$ ГТД Р-95Ш самолета Су-25 [4, с. 158; 6].

Каждому элементу множества S классифицируемых режимов работы ГТД определено значение желаемого выходного вектора НС $\bar{Y} = \{y_1; y_2; \dots; y_8\}$, представленного двоичным кодом.

При этом S_1, S_5, S_6, S_7 описывают участки переходных режимов работы исправного ГТД, S_2, S_3, S_4 — участки установившихся режимов работы исправного ГТД. Фиктивный режим работы S_8 не используется для описания исправного ГТД, а включает в себя участки с физически невозможными значениями зарегистрированных в БУР термогазодинамических параметров.

Анализ входных данных, обусловленных сбоями записей БУР и эксплуатационной технологической недостоверностью, и отнесение их к фиктивному режиму работы S_8 позволит дополнить процесс классификации процессом диагностирования системы измерения.

Выбор архитектуры и структуры нейронной связи

Задача определения участков, соответствующих различным режимам работы ГТД по записям БУР относится к задачам классификации временных рядов, при обработке которых широкое применение получили НС прямого распространения с использованием временной задержки входного сигнала [5, с. 799]. При этом применение НС прямого

Таблица 1 — Перечень входных данных для классификации режимов работы ГТД

Наименование параметра	Условное обозначение
1. Остаток топлива, кг	G_t
2. Температура газов за турбиной, °C	T_4
3. Частота оборотов ротора низкого давления (РНД), %	$N_{\text{РНД}}$
4. Частота оборотов ротора высокого давления (РВД), %	$N_{\text{РВД}}$
5. Положение ручки управления двигателем (РУД), градус	$\alpha_{\text{РУД}}$
6. Нажатие кнопки запуск (разовая команда)	$KH_{\text{зап}}$

Таблица 2 – Перечень множества S режимов работы ГТД Р-95Ш самолета Су-25

S_i	Классифицируемые режимы работы ГТД	Сигнал на выходе НС $\bar{Y} = \{y_1; y_2; \dots; y_8\}$							
		y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8
S_1	Запуск двигателя	1	0	0	0	0	0	0	0
S_2	Установившийся режим малого газа	0	1	0	0	0	0	0	0
S_3	Установившийся номинальный режим	0	0	1	0	0	0	0	0
S_4	Установившийся максимальный режим	0	0	0	1	0	0	0	0
S_5	Разгон	0	0	0	0	1	0	0	0
S_6	Дросселирование	0	0	0	0	0	1	0	0
S_7	Остановка	0	0	0	0	0	0	1	0
S_8	Фиктивный режим работы	0	0	0	0	0	0	0	1

распространения минимум с одним скрытым слоем нейронов и нелинейной функцией активации позволяет описывать логические функции любой сложности [7, с. 104].

Таким образом, для задачи классификации режимов работы ГТД была выбрана НС прямого распространения с одним скрытым слоем нейронов и временной задержкой входного сигнала. Архитектура данной НС приведена на рисунке 1.

Пусть $\bar{A}^n = \{a_1^n, a_2^n, \dots, a_{m_n}^n\}$ – выходной вектор сигналов нейронов n -го слоя, тогда математическую модель НС (рисунок 1) можно представить в виде следующей системы уравнений [5, с. 106]:

- для входного слоя ($n = 1$)

$$\bar{A}^1 = \bar{X}(t); \quad (3)$$

- для скрытого слоя ($n = 2$)

$$\bar{A}^2 = f \left(\sum_{j=1}^{m_1} W_{m_2 m_1}^1 a_j^1 + \eta_j \right), j = 1, 2, \dots, m_2; \quad (4)$$

- для выходного слоя ($n = 3$)

$$\bar{A}^3 = f \left(\sum_{j=1}^{m_2} W_{m_3 m_2}^2 a_j^2 + \chi_j \right), j = 1, 2, \dots, m_3, \quad (5)$$

где f – активационная функция нейронов скрытого и выходного слоев;

m_1, m_2, m_3 – число нейронов входного, скрытого и выходного слоев;

η_j, χ_j – величины смещения нейронов скрытого и выходного слоев;

$W_{m_2 m_1}^1, W_{m_3 m_2}^2$ – матрицы весовых синаптических связей, соединяющих нейроны третьего слоя со вторым и второго слоя с первым.

Количество нейронов входного слоя равняется $m_1 = n \cdot L = 6 \cdot L$, где n – количество входных данных (таблица 1), L – ширина временного окна, а количество нейронов выходного слоя $m_3 = 8$ равно количеству элементов, необходимых для распознавания НС (таблица 2).

Основными вопросами, требующими решения при выборе структуры НС, являются:

- выбор вида функции активации нейронов скрытого и выходного слоев;
- определение ширины временного «окна» L ;
- поиск оптимального количества нейронов в скрытом слое m_2 .

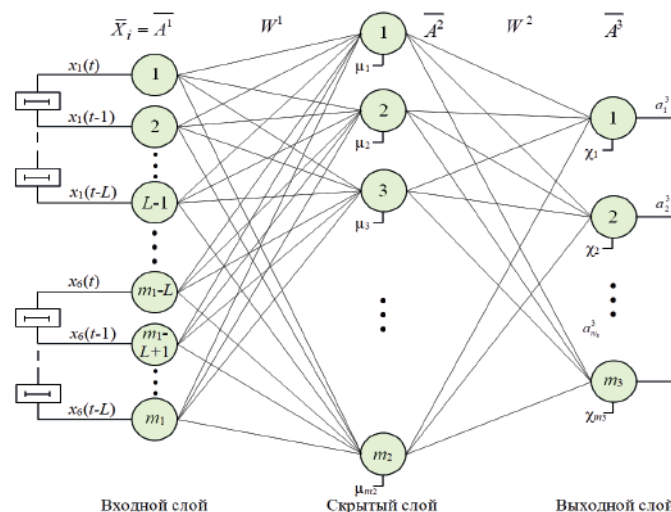


Рисунок 1 – Архитектура нейронной сети прямого распространения с временной задержкой входного сигнала

Функция активации определяет выходной сигнал нейрона в зависимости от индуцированного локального поля. На основании теоремы Колмогорова в терминологии теории НС [8, с. 13; 9, с. 167] в качестве функции активации нейронов применена униполярная сигмоидальная функция, так как выходной вектор представлен двоичным кодом. Сигмоидальная активационная функция определяется выражением

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-kx)}, \quad (6)$$

где $k=1$ — параметр наклона сигмоидальной функции активации.

При определении ширины временного окна важно учитывать следующие моменты: малый размер ширины не позволит правильно распознать этапы полета ЛА, а большой размер захватит соседние классы, что уменьшит достоверность классификации. При выборе оптимального количества нейронов в скрытом слое необходимо учитывать, что малое их количество приводит к некачественному обучению НС, а большое — к эффекту переобучения НС.

Ширина временного окна L и количество нейронов в скрытом слое m_2 определено экспериментальным путем как следствие минимума ошибки обучения E .

На рисунке 2, а представлена зависимость ошибки обучения НС E от размера временного окна L , на рисунке 2, б — от количества нейронов в скрытом слое m_2 .

Таким образом, для решения задачи классификации режимов работы ГТД с целью уменьшения ошибки обучения размер временного окна был при-

нят равным 9 тактам, количество нейронов скрытого слоя — 75.

Обучение нейронной сети

При обучении НС топология сети считается неизменной, а настройке подлежат веса связей между нейронами. Выбор того или иного метода обучения зависит от типа НС и от решаемых задач. Для обучения НС (3) — (5) был использован алгоритм обратного распространения ошибки.

При обучении НС сначала предъявляется образ $\bar{X}_i = \{x_1; x_2; \dots; x_6\}$, физические значения зарегистрированных в БУР термодинамических параметров (таблица 1), принадлежащий заранее известному классу S_i , представленному двоичным кодом $\bar{Y} = \{y_1; y_2; \dots; y_8\}$ (таблица 2), для которого вычисляется ошибка выхода [5, с. 225]

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{m_3} (a_i^3 - y_i)^2 \rightarrow \min, \quad (7)$$

где m_3 — количество выходов НС;

a_i^3 — вычисленное согласно выражениям (3) — (5);

y_i — желаемое значение i -го выхода НС соответственно.

Далее эта ошибка распространяется по сети в обратном направлении, изменяя веса межнейронных связей ΔW_1 и ΔW_2 (рисунок 3),

где $\bar{X}_i$ — входной вектор,

$\bar{A}_i^3$ — выходной вектор,

$\bar{Y}_i$ — вектор желаемых выходных реакций НС,

$\bar{E}_i$ — вектор ошибок НС, где $i = 1 \dots t$.

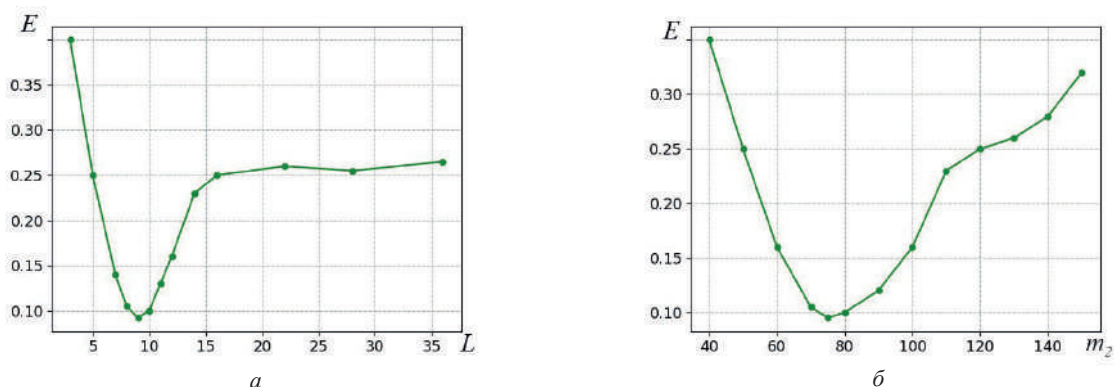


Рисунок 2 — Зависимость ошибки обучения НС от ширины временного окна (а) и количества нейронов в скрытом слое (б)

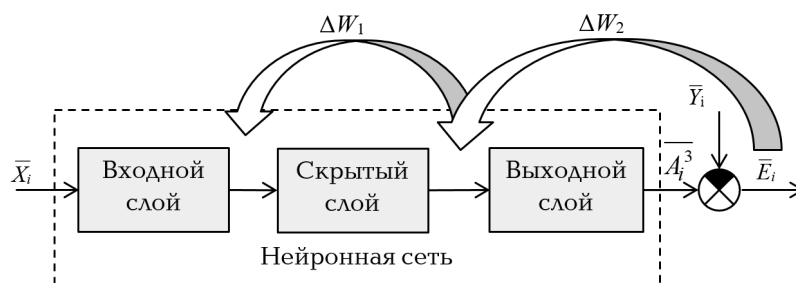


Рисунок 3 — Процесс обучения нейронной сети

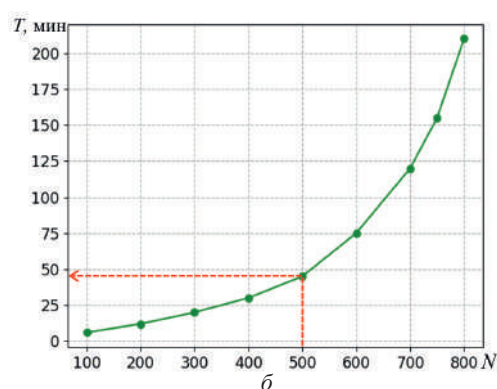
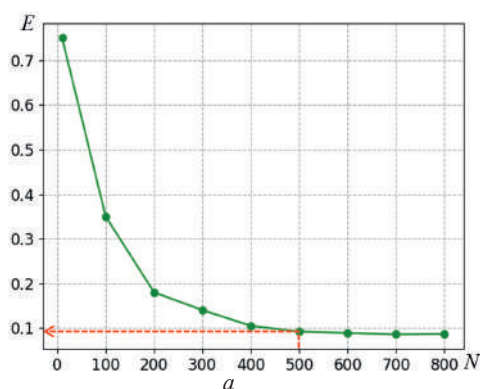


Рисунок 4 – Зависимость ошибки (а) и времени (б) от количества циклов обучения НС

Обучение НС производится методом градиентного спуска, т. е. на каждой итерации производится изменение веса по формулам [5, с. 225]

$$W_{ij}^n(t) = W_{ij}^n(t-1) + \Delta W_{ij}^n(t), \quad (8)$$

$$\Delta W_{ij}^n(t) = \Delta W_{ij}^n + \alpha[\Delta W_{ij}^n(t-1)], \quad (9)$$

$$\Delta W_{ij}^n = \frac{-\eta dE}{dW_{ij}^n}. \quad (10)$$

где α – коэффициент момента (импульса) ($\alpha = 0,5$);

η – величина, задающая скорость сходимости алгоритма обучения ($\eta = 0,3$) [5, с. 263].

Алгоритм обратного распространения ошибки для обучения НС классификации режимов работы ГТД S (см. таблицу 2) реализован на языке программирования Python 3.8 с использованием библиотеки PyTorch [10, с. 54–55] (процессор Intel Core i5). Графики зависимости ошибки E и времени T от количества циклов обучения НС N приведены на рисунке 4.

Анализ графиков (рисунок 4) показывает, что применение алгоритма обратного распространения ошибки приводит к эффективному обучению НС за 500 циклов. В этом случае ошибка обучения $E = 0,08$, а время, затраченное на обучение, не превышает 45 мин.

В результате обучения НС были идентифицированы параметры ее модели: весовые коэффициенты матриц $W_{m_2m_1}^1, W_{m_3m_2}^2$, а также величины смещения η , χ нейронов скрытого и выходного слоев соответственно.

Оценка эффективности автоматической классификации

Тестирование разработанного классификатора произведено на выборке, соответствующей 115 опробованиям ГТД Р-95Ш самолета Су-25 при выполнении регламентных работ и подготовок к полетам, при выполнении которых определено более 400 реализаций типовых участков, соответствующих отдельным режимам работы ГТД.

В качестве примера на рисунке 5 приведена одна из сигналограмм термодинамических процессов в ГТД Р-95Ш самолета Су-25 в момент запуска и опробования с соответствующими значениями выходов НС.

Как видно из рисунка 5, с использованием предложенного подхода автоматической классификации были определены участки временного ряда, соответствующие следующим режимам работы ГТД:

$t_1-t_2, t_{14}-t_{15}$ – запуск двигателя S_1 ;
 $t_2-t_3, t_{16}-t_{17}$ – установившийся режим малого газа S_2 ;
 $t_4-t_5, t_{11}-t_{12}, t_{13}-t_{14}$ – установившийся номинальный режим S_3 ;
 $t_6-t_7, t_9-t_{10}, t_{12}-t_{13}$ – установившийся максимальный режим S_4 ;
 $t_3-t_4, t_5-t_6, t_8-t_9$ – разгон S_5 ;
 $t_7-t_8, t_{10}-t_{11}, t_{15}-t_{16}$ – дросселирование S_6 ;
 t_{17} – момент остановки ГТД S_7 .

При этом на участке $t_{15}-t_{16}$ присутствуют моменты времени со сбйными кадрами термодинамических параметров (фиктивный режим работы S_8).

Для оценки эффективности автоматической классификации режимов работы двигателя были выбраны следующие показатели [11]:

- вероятность истинно положительной классификации P_k :

$$P_k = \frac{TP}{TP + FN}; \quad (11)$$

- вероятность ложноположительной классификации P_a (ошибка I рода):

$$P_a = \frac{FP}{FP + TN}; \quad (12)$$

- вероятность ложноотрицательной классификации P_b (ошибка II рода):

$$P_b = \frac{FN}{TP + FN} = 1 - P_k, \quad (13)$$

где TP – количество предъявлений объекта, при которых он был обнаружен;

FN – количество предъявлений объекта, при которых он не был обнаружен;

FP – количество сообщений о наличии объекта при его отсутствии;

TN – количество верно отвергнутых предъявлений системе классификации.

В таблице 3 представлены значения показателей эффективности автоматической классификации режимов работы ГТД Р-95Ш.

В результате исследования установлено, что вероятность истинно положительной классификации P_k режимов работы ГТД Р-95Ш самолета Су-25 составила более 0,96. Вероятность ошибки I рода (отнесе-

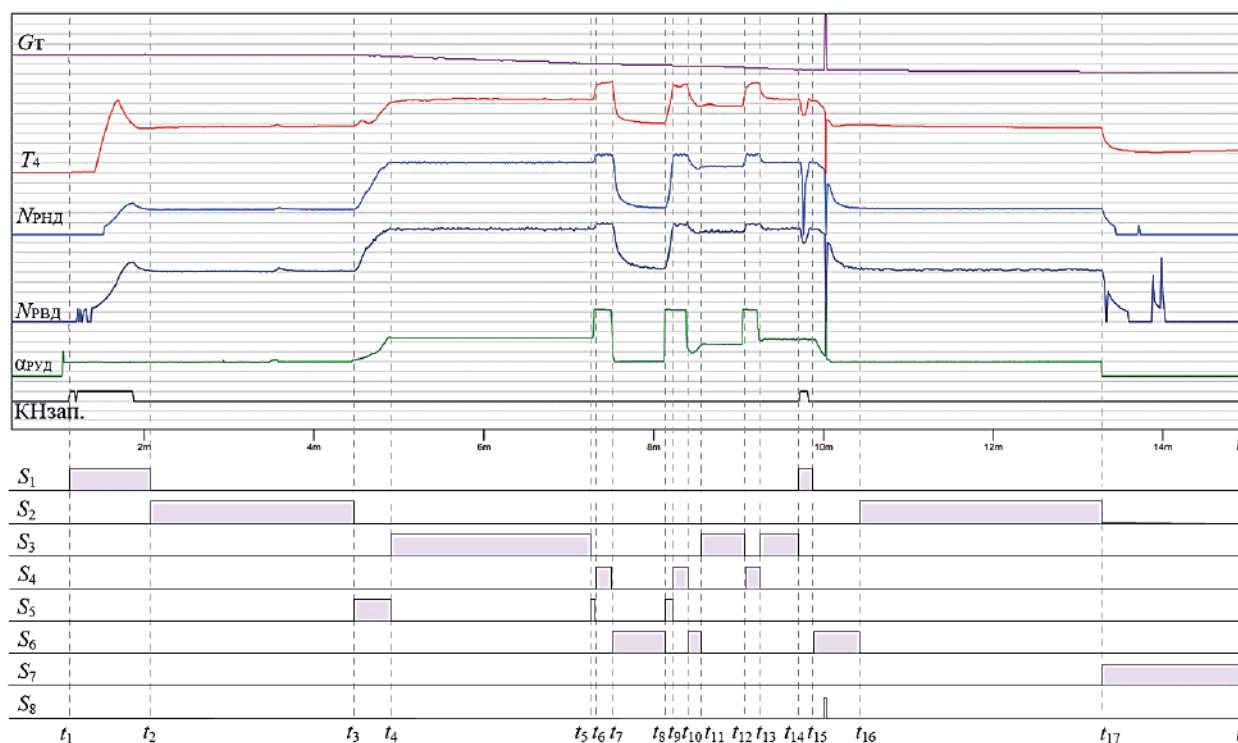


Рисунок 5 — Сигналограмма термодинамических процессов в ГТД типа Р-95Ш самолета Су-25 в момент запуска и опробования с соответствующими значениями выходов НС

Таблица 3 — Значения показателей эффективности классификации

Режим работы ГТД	Оценка вероятностей		
	P_k (мощность)	P_α (ошибка I рода)	P_β (ошибка II рода)
Запуск двигателя	0,99	0,005	0,01
Установившийся режим малого газа	0,99	0,010	0,01
Установившийся номинальный режим	0,98	0,012	0,02
Установившийся максимальный режим	0,97	0,015	0,03
Разгон	0,96	0,016	0,04
Дросселирование	0,97	0,014	0,03
Остановка	0,98	0,011	0,02

ние участка временного ряда к неверному классу режимов работы ГТД) не превысила 0,016 на тестовой выборке и обусловлена сбойными кадрами записей БУР. Вероятность ошибки II рода (пропуск события) не превысила 0,04 и обусловлена срывом классификации из-за неправильных действий авиационного персонала при опробовании ГТД.

Заключение

На основании полученных результатов исследования можно сделать следующие выводы:

1. Применение математического аппарата НС позволило автоматизировать процесс классифика-

ции режимов работы ГТД Р-95Ш самолета Су-25 по материалам ОК. При этом была выбрана модель НС прямого распространения с временной задержкой входного сигнала, причем оптимальный размер временного окна выбран равным 9, а количество нейронов в скрытом слое — 75.

2. Применение алгоритма обратного распространения ошибки приводит к эффективному обучению НС за 500 циклов, при этом ошибка обучения составила 0,08, а время обучения — 45 мин.

3. Анализ качества классификации режимов работы ГТД на примере двигателя Р-95Ш самолета Су-25 с помощью НС на основе данных, полученных в процессе обработки полетной информации, пока-

зал, что вероятность истинно положительной классификации P_k составила более 0,96.

4. Применение дополнительного выхода НС для классификации фиктивного режима работы S_8 позволяет дополнить процесс классификации процессом диагностирования системы измерения.

5. Рассмотренный алгоритм классификации может быть адаптирован для автоматизированной идентификации режимов работы ГТД иных типов.

6. Автоматизация процесса классификации режимов работы ГТД Р-95Ш позволит автоматизировать процесс анализа работоспособности силовой установки самолета Су-25 по материалам ОК.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Анализ состояния безопасности полетов в государственной авиации Республики Беларусь. – Минск : УВСРДГА, 2012. – 2022.
2. Ипполитов, С. В. Методы и средства объективного контроля : учеб. пособие / С. В. Ипполитов, В. Л. Кучевский, В. Т. Юдин. – Воронеж : ВАИУ, 2011. – 232 с.
3. Программно-аппаратный комплекс (ПАК-В) системы «Двина-М». Комплект общего программного обеспечения. Руководство оператора. ИБФС.839.51.00.00 РО. – Минск, 2017. – 79 с.
4. Методическое пособие по объективному контролю с использованием системы «Тестер» – «Луч-71» (для изделия Т8К). – М., 1989. – 184 с.
5. Хайкин, С. Нейронные сети : полный курс : пер. с англ. / С. Хайкин. – 2-е изд. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2016. – 1104 с.
6. Памятка летчику. Руководство по летной эксплуатации самолета Су-25. – М., 2007. – 576 с.
7. Воронцов, К. В. Математические методы обучения по прецедентам, теория обучения машин : курс лекций [Электронный ресурс] / К. В. Воронцов. – Режим доступа: <http://www.machinelearning.ru/wiki/images/6/6d/Voron-ML-1.pdf>. – Дата доступа: 19.12.2022.
8. Каширина, И. Л. Нейросетевые технологии : учеб.-метод. пособие / И. Л. Каширина. – М. : ВГУ, 2008. – 72 с.
9. Васильев, В. И. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика : учеб. пособие / В. И. Васильев, Б. Г. Ильясов. – М. : Радиотехника, 2009. – 392 с.
10. Rao, D. Natural Language Processing with PyTorch / D. Rao, B. McMahan. – Sebastopol : O'Reilly Media, 2019. – 210 p.
11. Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения : ГОСТ Р 50779.10–2000 : введ. РФ 29.12.2000. – М. : Технический комитет по стандартизации, 2000. – 26 с.

REFERENCES

1. Analysis of the state of flight safety in the state aviation of the Republic of Belarus. – Minsk : UVSRDGA, 2012. – 2022.
2. Ippolitov, S. V. Methods and means of objective control : textbook. manual / S. V. Ippolitov, V. L. Kuchevsky, V. T. Yudin. – Voronezh : VAI, 2011. – 232 p.
3. Software and hardware complex (PAK-V) of the Dvina-M system. A set of general software. Operator's manual. IBFS.839.51.00.00 RO. – Minsk, 2017. – 79 p.
4. Methodical manual on objective control using the Tester – Luch-71 system (for the T8K product). – M., 1989. – 184 p.
5. Khaykin, S. Neural networks : a complete course: translated from English / S. Khaykin. – 2nd ed. – Moscow : Williams Publishing House, 2016. – 1104 p.
6. Memo to the pilot. Manual for flight operation of the Su-25 aircraft. – M., 2007. – 576 p.
7. Vorontsov, K. V. Mathematical methods of teaching by precedents, theory of machine learning: a course of lectures [Electronic resource] / K. V. Vorontsov. – Access mode: <http://www.machinelearning.ru/wiki/images/6/6d/Voron-ML-1.pdf>. – Access date: 19.12.2022.
8. Kashirina, I. L. Neural network technologies : textbook. – method. Manual / I. L. Kashirina. – M. : VSU, 2008. – 72 p.
9. Vasiliev, V. I. Intelligent control systems. Theory and practice : studies. manual / V. I. Vasiliev, B. G. Ilyasov. – M. : Radio Engineering, 2009. – 392 p.
10. Rao, D. Natural Language Processing with PyTorch / D. Rao, B. McMahan. – Sebastopol : O'Reilly Media, 2019. – 210 p.
11. Statistical methods. Probability and the basics of statistics. Terms and definitions : GOST R 50779.10–2000 : introduction. RF 29.12.2000. – Moscow : Technical Committee for Standardization, 2000. – 26 p.

*Статья поступила в редакцию
03.04.2023*

МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕРНИЗАЦИИ СРЕДСТВ НАЗЕМНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЛЕТОВ

Гурвич Юрий Абрамович – кандидат технических наук, доцент кафедры естественнонаучных и общепрофессиональных дисциплин учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
gurvichyuribgaa@gmail.com

Yuri Gurvich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Natural Science and General Professional Disciplines of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus,
gurvichyuribgaa@gmail.com

Крамник Константин Константинович – военнослужащий учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь

Konstantin Kramnik – Serviceman of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus

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

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

Бурдин Иван Леонидович – курсант учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь

Ivan Burdin – Cadet of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus

Сенокосов Глеб Антонович – курсант учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь

Hleb Senokosov – Cadet of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus

Аннотация: обзор литературы показал, что нет ясности о влиянии углов установки колеса и наклона шкворня на критерии: износ шин, усилие на рулевом колесе в случае поломки или отключения усилителя руля, устойчивость и безопасность движения, плавность хода. Для знания этих динамических характеристик получены пять формализованных зависимостей влияния углов установки колеса и наклона шкворня на моменты инерции колеса с шиной относительно оси шкворня в функции: угла развала при вертикальном шкворне; угла схождения при вертикальном шкворне; углов развала и схождения при вертикальном шкворне; углов развала и схождения при шкворне, расположенном под углом поперечного наклона оси шкворня; углов развала и схождения при шкворне, расположенном под углами поперечного и продольного наклона оси шкворня. Выполнены расчеты моментов инерции для всех пяти случаев – с увеличением числа учтенных углов моменты инерции колес относительно осей шкворней возрастают.

Ключевые слова: углы установки колеса и наклона шкворня, моменты инерции колеса относительно оси шкворня.

Abstract: a review of the literature showed that there is no clarity about the influence of the angles of installation of the wheel and the inclination of the kingpin on the criteria: tire wear, steering effort in the event of a breakdown or disconnection of power steering, stability and safety of movement, smoothness of the ride. To know these dynamic characteristics, five formalized dependencies of the influence of the angles of installation of the wheel and the inclination of the kingpin on the moments of inertia of the wheel with the tire relative to the axis of the kingpin in the function are obtained: the angle of camber with a vertical kingpin; angle of convergence with a vertical kingpin; angles of camber and convergence with a vertical kingpin; angles of camber and convergence with a kingpin located at an angle of transverse inclination of the kingpin axis; angles of camber and convergence with a kingpin located at the angles of the transverse and longitudinal inclination of the kingpin axis. Calculations of the moments of inertia for all five cases are performed, - with an increase in the number of angles taken into account, the moments of inertia of the wheels relative to the axes of the kingpins increase.

Keywords: angles of installation of the wheel and inclination of the kingpin, moments of inertia of the wheel relative to the axis of the kingpin.

Введение

Во время эксплуатации средств наземного обеспечения полетов (СНОП), в частности, грузовых автомобилей, управляемые колеса с упругими шинами 80–90 % времени катятся по криволинейным траекториям [1] и могут совершать незатухающие колебания вокруг шкворней (автоколебания или шимми), вынужденные колебания вокруг осей цапф. В результате резко ухудшаются выходные характеристики всей машины: управляемость, устойчивость и безопасность движения, стабилизация, усилие на рулевом колесе, плавность хода, износ шин.

В связи с этим исследованию выходных характеристик машин и рабочих процессов рулевого управления, в том числе по двум критериям: износ шин и усилие на рулевом колесе в зависимости от углов установки колеса, наклона шкворня, конструктивных параметров рулевой трапеции, параметров мостов и подвесок, характеристик шин посвящено большое число теоретических и экспериментальных работ [1–15].

При проектировании и модернизации СНОП (рисунок 1) по двум критериям: износ шин и обеспечение необходимого усилия на рулевом колесе в случае поломки или отключения усилителя руля конструкторы сталкиваются, например, со всеми схожими вопросами у СНОП, как и у грузовых автомобилей [16].

Износ шин управляемых колес при движении транспортного средства зависит от значений ряда конструктивных параметров управляемых мостов, от углов установки колеса, от свойств шины, от условий эксплуатации [1]:

$$U = U(\alpha) + U(\epsilon) + U(\beta) + U(\gamma) + U(\text{ГПРТ}) + U(c_2, n_2) + \sum_{i=1}^n U_i,$$

где U – износ шин управляемых колес;

$U(\alpha)$ – износ шин в функции угла развала;

$U(\epsilon)$ – износ шин в функции угла схождения;

$U(\beta)$ – износ шин в функции угла поперечного наклона шкворня;

$U(\gamma)$ – износ шин в функции угла продольного наклона шкворня;

$U(\text{ГПРТ})$ – износ шин в функции геометрических параметров рулевых трапеций;

$U(c_2, n_2)$ – износ шин в функции коэффициентов жесткости c_2 и демпфирования n_2 рулевой трапеции; $\sum_{i=1}^n U_i$ – суммарный износ шин, зависящий от свойств шины, от условий эксплуатации и т. д.

В ходе подготовки летательных аппаратов к вылету АПА-5Д очень часто приходится выполнять сложные маневры с малыми радиусами поворотов (с маленькими радиусами кривизны). Поэтому ходимость шин у УРАЛ-4320 вместо 30 000 км всего 10 000 км.

Краткий обзор работ [1–16] показал, что окончательно не установлена степень влияния углов установки колеса и наклона шкворня на критерии: износ шин, усилие на рулевом колесе в случае поломки или отключения усилителя руля, устойчивость и безопасность движения, плавность хода. Для определения этих динамических критериев нужны формализованные зависимости влияния углов развала, схождения, поперечного и продольного наклона шкворня на моменты инерции колеса относительно оси шкворня.

В этой связи была поставлена цель механико-математическими методами вывести зависимости влияния углов установки колеса и наклона шкворня на моменты инерции колеса с шиной относительно оси шкворня двух средств наземного обеспечения полетов: УРАЛ-4320 и ЗиЛ-131.

Цель будет реализована путем последовательного рассмотрения этапов формализации зависимостей влияния углов развала и схождения колеса, поперечного и продольного наклона шкворня на моменты инерции колеса с шиной относительно оси шкворня.



Рисунок 1 – СНОП УГЗС МА-131 (ЗиЛ-131) – слева, АПА-5Д (УРАЛ-4320) во время технического обслуживания самолета

Формализация механико-математическими методами зависимостей моментов инерции колеса с шиной в функции углов установки колеса и наклона шкворня

Перевод величины схождения A–B из миллиметров в градусы (рисунки 2, 3)

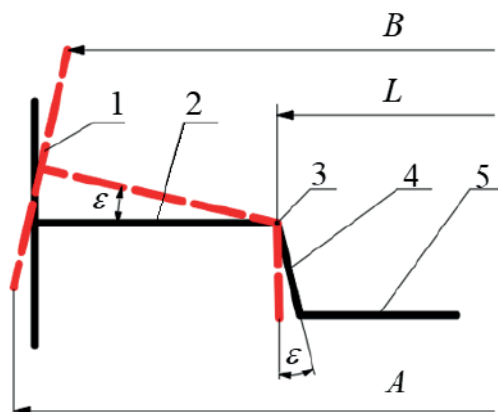


Рисунок 2 – Измерение схождения колес A–B с помощью линейки КАРО:

L – шкворневая коля; *l* – диск с цапфой, повернутый на угол схождения; 2 – диск с цапфой в нейтральном положении; 3 – шкворень; 4 – продольный рычаг рулевой трапеции; 5 – поперечная регулируемая тяга рулевой трапеции

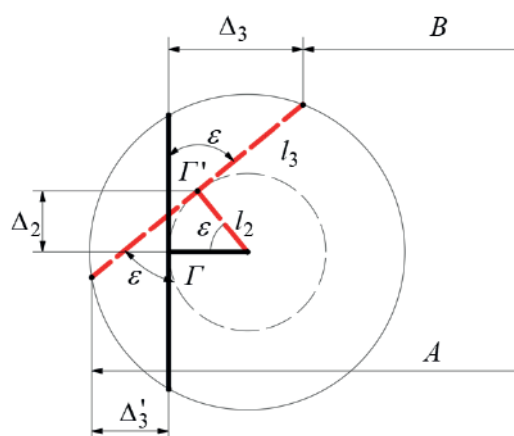


Рисунок 3 – Схема для определения величины схождения ε в градусах:

l_3 – радиус диска колеса

Выполним вычисления угла схождения ε в градусах:

$$\begin{aligned}\Delta_3 &= l_3 \sin \varepsilon + (l_2 - l_2 \cos \varepsilon), \quad A = L + 2l_2 + 2\Delta_3', \\ \Delta_3' &= l_3 \sin \varepsilon - (l_2 - l_2 \cos \varepsilon), \quad B = L + 2l_2 - 2\Delta_3, \\ A - B &= 2\Delta_3' + 2\Delta_3 = \\ &= 2l_3 \sin \varepsilon - 2(l_2 - l_2 \cos \varepsilon) + 2l_3 \sin \varepsilon + \\ &\quad + 2(l_2 - l_2 \cos \varepsilon) = 4l_3 \sin \varepsilon.\end{aligned}$$

УРАЛ-4320

$$A - B = 3 \text{ мм} = 4l_3 \sin \varepsilon_{\min}$$

$$A - B = 8 \text{ мм} = 4l_3 \sin \varepsilon_{\max}$$

$$l_3 = 277 \text{ мм}$$

$$\varepsilon_{\min} = \arcsin \frac{3}{4l_3}$$

$$\varepsilon_{\max} = \arcsin \frac{8}{4l_3}$$

$$\varepsilon_{\min} \cong 0,155133^\circ$$

$$\varepsilon_{\max} \cong 0,413692^\circ$$

ЗуА-131

$$A - B = 2 \text{ мм} = 4l_3 \sin \varepsilon_{\min}$$

$$A - B = 5 \text{ мм} = 4l_3 \sin \varepsilon_{\max}$$

$$l_3 = 277 \text{ мм}$$

$$\varepsilon_{\min} = \arcsin \frac{2}{4l_3}$$

$$\varepsilon_{\max} = \arcsin \frac{5}{4l_3}$$

$$\varepsilon_{\min} \cong 0,103422^\circ$$

$$\varepsilon_{\max} \cong 0,258556^\circ$$

Вывод зависимостей моментов инерции колеса с шиной в функции углов установки колеса и наклона шкворня

Исходной информацией для вывода механико-математическими методами зависимостей моментов инерции колеса с шиной в функции углов установки колеса и наклона шкворня являются формулы для вычисления момента инерции твердого тела относительно любой оси, проходящей через начало ортогональной декартовой системы координат XYZ имеет вид

$$\begin{aligned}J_v &= A \cdot \cos^2 \alpha + B \cdot \cos^2 \beta + C \cdot \cos^2 \gamma - 2D \cdot \cos \beta \cdot \cos \gamma - \\ &\quad - 2E \cdot \cos \gamma \cdot \cos \alpha - 2F \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta,\end{aligned}$$

где $A = J_x$, $B = J_y$, $C = J_z$ – осевые моменты инерции; α , β , γ – углы наклона оси v к осям ортогональной декартовой системы координат XYZ;

$D = J_{yz}$, $E = J_{zx}$, $F = J_{xy}$ – центробежные моменты инерции (ЦМИ);

$J_{xy} = J_{yx}$, $J_{yz} = J_{zy}$, $J_{zx} = J_{xz}$ – ЦМИ симметричны относительно своих индексов.

Для вычисления моментов инерции колеса с шиной относительно произвольной оси необходимо применить формулу установления связи косинуса угла φ между двумя прямыми, выходящими из начала ортогональной декартовой системы координат XYZ с углами наклона $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$, $i = 1, 2$ к этим осям:

$$\cos \varphi = \cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2 + \cos \beta_1 \cdot \cos \beta_2 + \cos \gamma_1 \cdot \cos \gamma_2.$$

В первом приближении управляемые колеса ОИ-25 (370×508) и М-93 (320×508) будем рассматри-

вать как тела правильной формы, обладающие центральной симметрией. Поэтому ЦМИ пренебрегаем.

Рассмотрим пять случаев определения моментов инерции колеса с шиной относительно оси шкворня. Во всех пяти случаях принято, что $J_x = J_z = 0,5J_y$, где y – ось вращения колеса с шиной.

Первый случай – $\alpha \neq 0, \varepsilon = 0, \beta = 0, \gamma = 0$.

На рисунке 4 показаны три подвижные ортогональные оси x, y, z , жестко связанные с колесом, начало координат которых расположено в центре тяжести колеса C ; три неподвижные ортогональные оси ξ, η, ζ жестко связанные с центром шкворня O ; ось ω , параллельная оси шкворня. Оси y и z поворачиваются вокруг оси ξ на угол α , ось y опускается ниже плоскости Π и из положения A переходит в положение A' , а ось z – из положения B в B' .

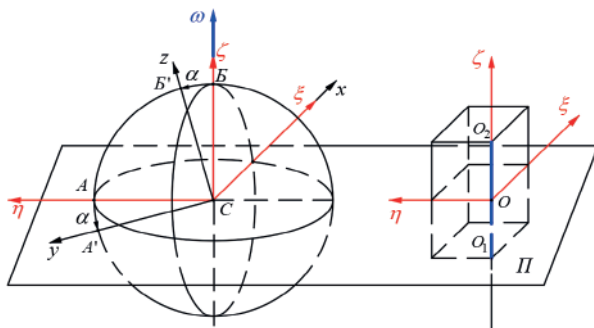


Рисунок 4 – Ориентация осей колеса (xyz) относительно шкворня для первого случая $\alpha \neq 0, \varepsilon = 0, \beta = 0, \gamma = 0$

$$J_{\omega} = J_x \cos^2 \angle \omega Cx + J_y \cos^2 \angle \omega Cy + J_z \cos^2 \angle \omega Cz.$$

Составляем таблицу углов между подвижными и неподвижными осями.

	ξ	η	ζ
x	0°	90°	90°
y	90°	α	$90^\circ + \alpha$
z	90°	$90^\circ - \alpha$	α
ω	90°	90°	0°

$$\cos \angle \omega Cx = \cos 0^\circ \cdot \cos 90^\circ + \cos 90^\circ \cdot \cos 90^\circ + \cos 90^\circ \cdot \cos 0^\circ = 0,$$

$$\cos \angle \omega Cy = \cos 90^\circ \cdot \cos 90^\circ + \cos \alpha \cdot \cos 90^\circ + \cos (90^\circ + \alpha) \cdot \cos 0^\circ = -\sin \alpha,$$

$$\cos \angle \omega Cz = \cos 90^\circ \cdot \cos 90^\circ + \cos (90^\circ - \alpha) \cdot \cos 90^\circ + \cos \alpha \cdot \cos 0^\circ = \cos \alpha.$$

$J_{\omega}^{(1)} = J_y \sin^2 \alpha + 0,5 \cdot J_y \cos^2 \alpha$ – момент инерции колеса относительно оси, параллельной оси шкворня, проходящей через центр колеса.

$J_{O_1 O_2}^{(1)} = J_y \sin^2 \alpha + 0,5 \cdot J_y \cos^2 \alpha + m \cdot OC^2$ – момент инерции колеса относительно оси шкворня.

Расчеты для УРАЛ-4320

$$J_{\omega}^{(1)} = J_y \cdot (\sin^2 1^\circ + 0,5 \cdot \cos^2 1^\circ) = J_y \cdot 0,500152,$$

$$J_{O_1 O_2}^{(1)} = J_y \cdot (\sin^2 1^\circ + 0,5 \cdot \cos^2 1^\circ) + 161 \cdot 0,225^2 = J_y \cdot 0,500152 + 8,151.$$

Расчеты для Зил-131

$$J_{\omega}^{(1)} = J_y \cdot (\sin^2 1^\circ + 0,5 \cdot \cos^2 1^\circ) = J_y \cdot 0,500152,$$

$$J_{O_1 O_2}^{(1)} = J_y \cdot (\sin^2 1^\circ + 0,5 \cdot \cos^2 1^\circ) + 131 \cdot 0,152^2 = J_y \cdot 0,500152 + 3,027.$$

Второй случай – $\varepsilon \neq 0, \alpha = 0, \beta = 0, \gamma = 0$.

На рисунке 5 показаны три подвижные оси x, y, z , жестко связанные с колесом, начало координат которых расположено в центре тяжести колеса C , и три неподвижные оси ξ, η, ζ жестко связанные с центром шкворня O ; ось ω , параллельная оси шкворня. Оси x и y поворачиваются вокруг оси ζ на угол ε . Ось y из положения B переходит в положение B' , а ось x – из положения Γ в Γ' .

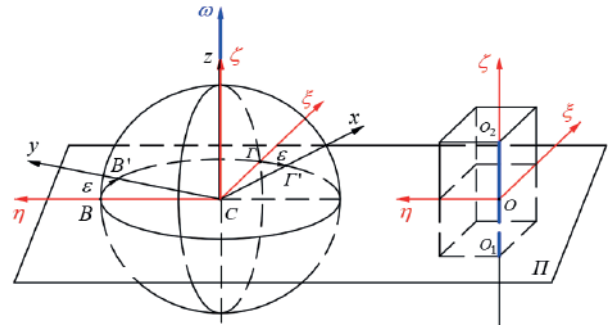


Рисунок 5 – Ориентация осей колеса (xyz) относительно шкворня для второго случая $\varepsilon \neq 0, \alpha = 0, \beta = 0, \gamma = 0$

$$J_{\omega} = J_x \cos^2 \angle \omega Cx + J_y \cos^2 \angle \omega Cy + J_z \cos^2 \angle \omega Cz.$$

Составляем таблицу углов между подвижными и неподвижными осями.

	ξ	η	ζ
x	ε	$90^\circ - \varepsilon$	90°
y	$90^\circ - \varepsilon$	ε	90°
z	90°	90°	0°
ω	90°	90°	0°

$$\cos \angle \omega Cx = \cos \varepsilon \cdot \cos 90^\circ + \cos (90^\circ + \varepsilon) \cdot \cos 90^\circ + \cos 90^\circ \cdot \cos 0^\circ = 0,$$

$$\cos \angle \omega Cy = \cos (90^\circ - \varepsilon) \cdot \cos 90^\circ + \cos \varepsilon \cdot \cos 90^\circ + \cos 90^\circ \cdot \cos 0^\circ = 0,$$

$$\cos \angle \omega Cz = \cos 90^\circ \cdot \cos 90^\circ + \cos 90^\circ \cdot \cos 90^\circ + \cos 0^\circ \cdot \cos 0^\circ = 1.$$

$$J_{\omega}^{(2)} = 0,5 \cdot J_y \cos^2 \angle \omega Cz = 0,5 \cdot J_y \quad \text{– момент инерции}$$

ции колеса относительно оси, параллельной оси шкворня, проходящей через центр колеса.

$J_{O_1O_2}^{(2)} = 0,5 \cdot J_y + m \cdot OC^2$ – момент инерции колеса относительно оси шкворня.

Расчеты для УРАЛ-4320

$$J_{\omega}^{(2)} = 0,5 \cdot J_y,$$

$$J_{O_1O_2}^{(2)} = 0,5 J_y + 161 \cdot 0,225^2 = 0,5 J_y + 8,151.$$

Расчеты для Зил-131

$$J_{\omega}^{(2)} = 0,5 \cdot J_y,$$

$$J_{O_1O_2}^{(2)} = 0,5 J_y + 131 \cdot 0,152^2 = 0,5 J_y + 3,027.$$

Третий случай – $\alpha \neq 0, \varepsilon \neq 0, \beta = 0, \gamma = 0$.

На рисунке 6 показаны: три подвижные оси x, y, z , жестко связанные с колесом, начало координат которых расположено в центре тяжести колеса C , и три неподвижные оси ξ, η, ζ жестко связанные с центром шкворня O ; ось ω , параллельная оси шкворня; оси y и z поворачиваются вокруг оси ξ на угол α и вокруг оси ζ на угол ε . Ось y переходит из положения A в A' , затем – в A'' ; ось z из B в B' , затем – в B'' ; а ось x – переходит из Γ в Γ' .

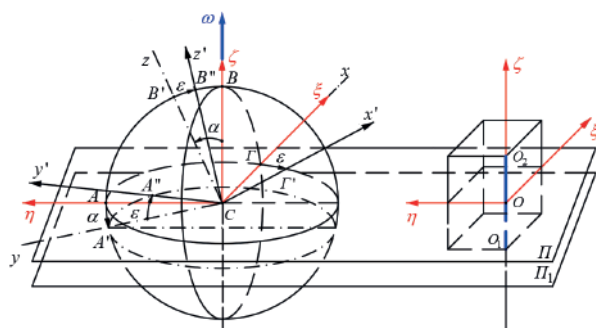


Рисунок 6 – Ориентация осей колеса $x'y'z'$ относительно шкворня для третьего случая $\alpha \neq 0, \varepsilon \neq 0, \beta = 0, \gamma = 0$

$$J_{\omega} = J_x \cos^2 \angle \omega Cx + J_y \cos^2 \angle \omega Cy + J_z \cos^2 \angle \omega Cz.$$

Составляем таблицу углов между подвижными и неподвижными осями.

	ξ	η	ζ
x	$\angle \xi Cx$	$\angle \eta Cx$	$\angle \zeta Cx$
y	$\angle \xi Cy$	$\angle \eta Cy$	$\angle \zeta Cy$
z	$\angle \xi Cz$	$\angle \eta Cz$	$\angle \zeta Cz$
ω	90°	90°	0°

$$\cos \angle \xi Cx = \cos \varepsilon,$$

$$\cos \angle \xi Cy = \cos \alpha \cdot \cos(90^\circ - \varepsilon) = \cos \alpha \cdot \sin \varepsilon,$$

$$\cos \angle \xi Cz = \cos \alpha \cdot \cos(90^\circ - \varepsilon) = \cos \alpha \cdot \sin \varepsilon,$$

$$\cos \angle \eta Cx = \cos(90^\circ + \varepsilon) = -\sin \varepsilon,$$

$$\cos \angle \eta Cy = \cos \alpha \cdot \cos \varepsilon,$$

$$\cos \angle \eta Cz = \cos(90^\circ - \alpha) \cdot \cos \varepsilon = \sin \alpha \cdot \cos \varepsilon,$$

$$\cos \angle \zeta Cx = \cos 90^\circ,$$

$$\cos \angle \zeta Cy = \cos(90^\circ + \alpha) \cdot \cos \varepsilon = -\sin \alpha \cdot \cos \varepsilon,$$

$$\cos \angle \zeta Cz = \cos \alpha \cdot \cos \varepsilon,$$

$$\cos \angle \omega Cx = \cos \varepsilon \cdot \cos 90^\circ - \sin \varepsilon \cdot \cos 90^\circ +$$

$$+ \cos 90^\circ \cdot \cos 0^\circ = 0,$$

$$\cos \angle \omega Cy = \cos \alpha \cdot \sin \varepsilon \cdot \cos 90^\circ +$$

$$+ \cos \alpha \cdot \cos \varepsilon \cdot \cos 90^\circ - \sin \alpha \cdot \cos \varepsilon \cdot \cos 90^\circ = 0,$$

$$\cos \angle \omega Cz = \cos \alpha \cdot \sin \varepsilon \cdot \cos 90^\circ +$$

$$+ \sin \alpha \cdot \cos \varepsilon \cdot \cos 90^\circ + \cos \alpha \cdot \cos \varepsilon \cdot \cos 0^\circ =$$

$$= \cos \alpha \cdot \cos \varepsilon,$$

$$J_{\omega}^{(3)} = J_z \cdot \cos^2 \alpha \cdot \cos^2 \varepsilon = 0,5 \cdot J_y \cos^2 \alpha \cdot \cos^2 \varepsilon,$$

$$J_{O_1O_2}^{(3)} = 0,5 \cdot J_y \cos^2 \alpha \cdot \cos^2 \varepsilon + m \cdot OC^2.$$

Расчеты для УРАЛ-4320

$$J_{\omega}^{(3)} = 0,5 \cdot J_y \cdot \cos^2 1^\circ \cdot \cos^2 0,413692^\circ = J_y \cdot 0,499821,$$

$$J_{O_1O_2}^{(3)} = 0,5 \cdot J_y \cdot \cos^2 1^\circ \cdot \cos^2 0,413692^\circ + 161 \cdot 0,225^2 =$$

$$= J_y \cdot 0,499821 + 8,151.$$

Расчеты для Зил-131

$$J_{\omega}^{(3)} = 0,5 \cdot J_y \cdot \cos^2 1^\circ \cdot \cos^2 0,258556^\circ = J_y \cdot 0,499838,$$

$$J_{O_1O_2}^{(3)} = 0,5 \cdot J_y \cdot \cos^2 1^\circ \cdot \cos^2 0,258556^\circ + 131 \cdot 0,152^2 =$$

$$= J_y \cdot 0,499838 + 3,027.$$

Четвертый случай – $\alpha \neq 0, \varepsilon \neq 0, \beta \neq 0, \gamma = 0$.

На рисунке 7 показаны три подвижные оси x, y, z , жестко связанные с колесом, начало координат которых расположено в центре тяжести колеса C ; три неподвижные оси ξ, η, ζ жестко связанные с центром шкворня O ; ось ω , параллельная оси шкворня. Оси y и z поворачиваются вокруг оси ξ на угол α и вокруг оси ζ на угол ε . Ось y переходит из положения A в A' , затем в A'' ; ось z из B в B' , затем в B'' ; а ось x – переходит из Γ в Γ' .

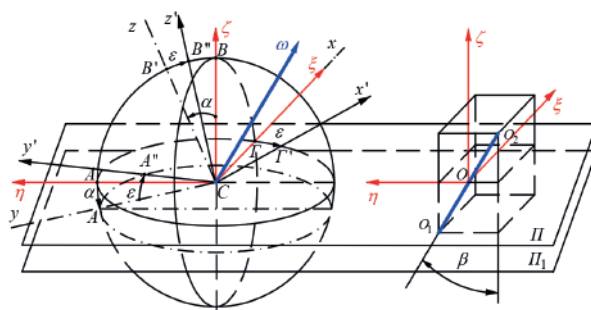


Рисунок 7 – Ориентация осей колеса $x'y'z'$ относительно шкворня для четвертого случая $\alpha \neq 0, \varepsilon \neq 0, \beta \neq 0, \gamma = 0$.

$$J_{\omega} = J_x \cos^2 \angle \omega Cx + J_y \cos^2 \angle \omega Cy + J_z \cos^2 \angle \omega Cz.$$

Составляем таблицу углов между подвижными и неподвижными осями.

	ξ	η	ζ
x	$\angle \xi Cx$	$\angle \eta Cx$	$\angle \zeta Cx$
y	$\angle \xi Cy$	$\angle \eta Cy$	$\angle \zeta Cy$
z	$\angle \xi Cz$	$\angle \eta Cz$	$\angle \zeta Cz$
ω	90°	$90^\circ - \varepsilon$	β

$$\cos \angle \omega Cx = \cos \varepsilon \cdot \cos 90^\circ - \sin \varepsilon \cdot \cos(90^\circ + \beta) + \cos 90^\circ \cdot \cos \beta = \sin \varepsilon \cdot \sin \beta,$$

$$\begin{aligned} \cos \angle \omega Cy &= \cos \alpha \cdot \sin \varepsilon \cdot \cos 90^\circ + \\ &+ \cos \alpha \cdot \cos \varepsilon \cdot \cos(90^\circ + \beta) - \sin \alpha \cdot \cos \varepsilon \cdot \cos \beta = \\ &= -\cos \alpha \cdot \cos \varepsilon \cdot \sin \beta - \sin \alpha \cdot \cos \varepsilon \cdot \cos \beta, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \cos \angle \omega Cz &= \cos \alpha \cdot \sin \varepsilon \cdot \cos 90^\circ + \\ &+ \sin \alpha \cdot \cos \varepsilon \cdot \cos(90^\circ + \beta) + \cos \alpha \cdot \cos \varepsilon \cdot \cos \beta = \\ &= -\sin \alpha \cdot \cos \varepsilon \cdot \sin \beta + \cos \alpha \cdot \cos \varepsilon \cdot \cos \beta, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J_{\omega}^{(4)} &= 0,5 \cdot J_y \cdot \sin^2 \varepsilon \cdot \sin^2 \beta + \\ &+ J_y \cdot \cos^2 \varepsilon (\cos \alpha \cdot \sin \beta + \sin \alpha \cdot \cos \beta)^2 + \\ &+ 0,5 \cdot J_y \cdot \cos^2 \varepsilon (\cos \alpha \cdot \cos \beta - \sin \alpha \cdot \sin \beta)^2, \\ J_{\omega}^{(4)} &= J_y [0,5 \cdot \sin^2 \varepsilon \cdot \sin^2 \beta + \cos^2 \varepsilon \cdot \sin^2 (\alpha + \beta) + \\ &+ 0,5 \cdot \cos^2 \varepsilon \cdot \cos^2 (\alpha + \beta)], \\ J_{O_1 O_2}^{(4)} &= J_{\omega}^{(4)} + m \cdot OC^2 \cdot \cos^2 \beta. \end{aligned}$$

Расчеты для УРАЛ-4320

$$\begin{aligned} J_{\omega}^{(4)} &= J_y [0,5 \cdot \sin^2 0,413692^\circ \cdot \sin^2 (6^\circ) + \\ &+ \cos^2 0,413692^\circ \cdot \sin^2 (1^\circ + 6^\circ) + 0,5 \times \\ &\times \cos^2 0,413692^\circ \cdot \cos^2 (1^\circ + 6^\circ)] = J_y \cdot 0,507399, \\ J_{O_1 O_2}^{(4)} &= J_y \cdot 0,507399 + 161 \cdot 0,225^2 \cdot \cos^2 6^\circ = \\ &= J_y \cdot 0,507399 + 8,062. \end{aligned}$$

Расчеты для Зул-131

$$\begin{aligned} J_{\omega}^{(4)} &= J_y [0,5 \cdot \sin^2 0,258556^\circ \cdot \sin^2 5^\circ + \\ &+ \cos^2 0,258556^\circ \cdot \sin^2 (1^\circ + 5^\circ) + 0,5 \times \\ &\times \cos^2 0,258556^\circ \cdot \cos^2 (1^\circ + 5^\circ)] = J_y \cdot 0,505452, \\ J_{O_1 O_2}^{(4)} &= J_y \cdot 0,505452 + 131 \cdot 0,152^2 \cdot \cos^2 5^\circ = \\ &= J_y \cdot 0,505452 + 3,0037. \end{aligned}$$

Пятый случай — $\alpha \neq 0, \varepsilon \neq 0, \beta \neq 0, \gamma \neq 0$.

На рисунке 8 показаны три подвижные оси x, y, z , жестко связанные с колесом, начало координат которых расположено в центре тяжести колеса C ; три неподвижные оси ξ, η, ζ , жестко связанные с центром шкворня O . Ось ω , параллельная оси шкворня. Оси y

и z поворачиваются вокруг оси ξ на угол α и вокруг оси ζ на угол ε . Ось y переходит из положения A в A' , затем — в A'' ; ось z переходит из B в B' , затем в B'' ; ось x переходит из Γ в Γ' .

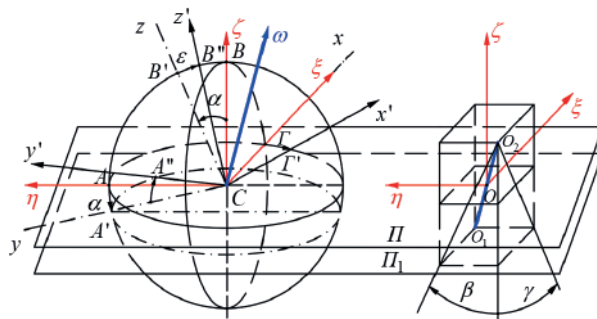


Рисунок 8 — Ориентация осей колеса x, y, z относительно шкворня для пятого случая $\alpha \neq 0, \varepsilon \neq 0, \beta \neq 0, \gamma \neq 0$

$$J_{\omega} = J_x \cos^2 \angle \omega Cx + J_y \cos^2 \angle \omega Cy + J_z \cos^2 \angle \omega Cz.$$

Составляем таблицу углов между подвижными и неподвижными осями.

	ξ	η	ζ
x	$\angle \xi Cx$	$\angle \eta Cx$	$\angle \zeta Cx$
y	$\angle \xi Cy$	$\angle \eta Cy$	$\angle \zeta Cy$
z	$\angle \xi Cz$	$\angle \eta Cz$	$\angle \zeta Cz$
ω	$\angle \omega C\xi$	$\angle \omega C\eta$	$\angle \omega C\zeta$

Проведя несложные преобразования и обозна-

чив $\frac{1}{\sqrt{\text{tg}^2 \gamma + \text{tg}^2 \beta + 1}} = \lambda$, получим:

$$\cos \angle \omega C\xi = -\frac{\text{tg} \gamma}{\sqrt{\text{tg}^2 \gamma + \text{tg}^2 \beta + 1}} = -\lambda \cdot \text{tg} \gamma,$$

$$\cos \angle \omega C\eta = -\frac{\text{tg} \beta}{\sqrt{\text{tg}^2 \gamma + \text{tg}^2 \beta + 1}} = -\lambda \cdot \text{tg} \beta,$$

$$\cos \angle \omega C\zeta = \frac{1}{\sqrt{\text{tg}^2 \gamma + \text{tg}^2 \beta + 1}} = \lambda,$$

$$\cos \angle \omega Cx = -\cos \varepsilon \cdot \lambda \cdot \text{tg} \gamma + \sin \varepsilon \cdot \lambda \cdot \text{tg} \beta,$$

$$\begin{aligned} \cos \angle \omega Cy &= -\cos \alpha \cdot \sin \varepsilon \cdot \lambda \cdot \text{tg} \gamma - \\ &- \cos \alpha \cdot \cos \varepsilon \cdot \lambda \cdot \text{tg} \gamma - \sin \alpha \cdot \cos \varepsilon \cdot \lambda, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \cos \angle \omega Cz &= -\cos \alpha \cdot \sin \varepsilon \cdot \lambda \cdot \text{tg} \gamma - \\ &- \sin \alpha \cdot \cos \varepsilon \cdot \lambda \cdot \text{tg} \beta + \cos \alpha \cdot \cos \varepsilon \cdot \lambda, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \cos^2 \angle \omega Cx &= \lambda^2 (\sin^2 \varepsilon \cdot \text{tg}^2 \beta + \cos^2 \varepsilon \cdot \text{tg}^2 \gamma - \\ &- \sin 2\varepsilon \cdot \text{tg} \gamma \cdot \text{tg} \beta) (*), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \cos^2 \angle \omega Cy &= \lambda^2 (\cos^2 \alpha \cdot \sin^2 \varepsilon \cdot \text{tg}^2 \gamma + \\ &+ \cos^2 \alpha \cdot \cos^2 \varepsilon \cdot \text{tg}^2 \beta + \cos^2 \alpha \cdot \sin 2\varepsilon \cdot \text{tg} \gamma \cdot \text{tg} \beta + \\ &+ \sin^2 \alpha \cdot \cos^2 \varepsilon - \cos^2 \alpha \cdot \sin \alpha \cdot \sin 2\varepsilon \cdot \cos \varepsilon \cdot \text{tg} \gamma \cdot \text{tg} \beta) (**), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\cos^2 \angle \omega C z &= \lambda^2 (\cos^2 \alpha \cdot \sin^2 \varepsilon \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma + \sin^2 \alpha \cdot \cos^2 \varepsilon \cdot \operatorname{tg}^2 \beta + \\
&+ \cos \alpha \cdot \sin \alpha \cdot \sin 2\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{tg} \beta + \cos^2 \alpha \cdot \cos^2 \varepsilon + \\
&+ \cos^2 \alpha \cdot \sin \alpha \cdot \sin 2\varepsilon \cdot \cos \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{tg} \beta) (**), \\
J_{\omega}^{(5)} &= J_y \lambda^2 (0,5 \cdot (*) + (**)) = \\
&= J_y \lambda^2 (0,5 \cdot (\sin^2 \varepsilon \cdot \operatorname{tg}^2 \beta + \cos^2 \varepsilon \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma - \sin 2\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{tg} \beta) + \\
&+ (\cos^2 \alpha \cdot \sin^2 \varepsilon \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma + \cos^2 \alpha \cdot \cos^2 \varepsilon \cdot \operatorname{tg}^2 \beta + \\
&+ \cos^2 \alpha \cdot \sin 2\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{tg} \beta + \sin^2 \alpha \cdot \cos^2 \varepsilon - \\
&- \cos^2 \alpha \cdot \sin \alpha \cdot \sin 2\varepsilon \cdot \cos \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{tg} \beta) + \\
&+ 0,5 \cdot (\cos^2 \alpha \cdot \sin^2 \varepsilon \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma + \sin^2 \alpha \cdot \cos^2 \varepsilon \cdot \operatorname{tg}^2 \beta + \\
&+ \cos \alpha \cdot \sin \alpha \cdot \sin 2\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{tg} \beta + \cos^2 \alpha \cdot \cos^2 \varepsilon + \\
&+ \cos^2 \alpha \cdot \sin \alpha \cdot \sin 2\varepsilon \cdot \cos \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{tg} \beta)).
\end{aligned}$$

Упростим это выражение:

$$\begin{aligned}
J_{\omega}^{(5)} &= \frac{J_y}{\operatorname{tg}^2 \gamma + \operatorname{tg}^2 \beta + 1} \left[\operatorname{tg}^2 \beta (1 + \sin^2 \varepsilon + \cos^2 \varepsilon \cdot \sin^2 \alpha) + \right. \\
&+ \operatorname{tg}^2 \gamma (2 \cos^2 \varepsilon + 3 \cos^2 \alpha \cdot \sin^2 \varepsilon) + \\
&+ \cos^2 \varepsilon \cdot (1 + \cos^2 \alpha) + \operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \sin 2\varepsilon \times \\
&\times (\cos^2 \alpha \cdot \sin \alpha \cdot \cos \varepsilon + \sin 2\alpha + \cos^2 \alpha - 2) \left. \right]. \\
J_{O_1 O_2}^{(5)} &= J_{\omega}^{(5)} + m \cdot OC^2 \cos^2 \theta.
\end{aligned}$$

Определение угла θ

Проведем прямую $A_1 E$ параллельную оси шкворня CB_1 и введем на рисунке 9 обозначения углов $\alpha, \beta, \gamma, \delta$.

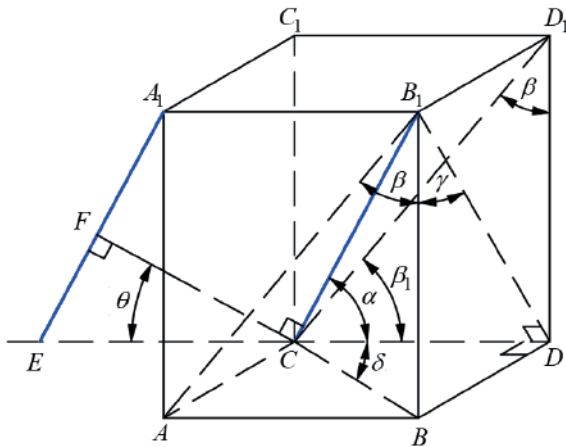


Рисунок 9 — Определение угла θ через известные углы β и γ

Из рисунка 9 следует, что:

$$\begin{aligned}
\operatorname{tg} \gamma &= \frac{BD}{BB_1}, \operatorname{tg} \beta = \frac{AB}{BB_1} = \frac{CD}{BB_1}, \operatorname{tg} \delta = \frac{BD}{CD}, \\
\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \delta &= \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg} \beta}, \operatorname{tg} \alpha = \frac{B_1 D}{CD}, \operatorname{tg} \beta_1 = \frac{BD}{CD} \end{aligned} \right\} &= \frac{DD_1}{CD}, \\
B_1 D^2 &= D_1 D^2 + BD^2, \frac{B_1 D^2}{CD^2} = \frac{D_1 D^2}{CD^2} + \frac{BD^2}{CD^2}, \\
\operatorname{tg}^2 \alpha &= \operatorname{tg}^2 \beta_1 + \operatorname{tg}^2 \delta, \operatorname{tg}^2 \alpha = \operatorname{tg}^2 (90^\circ - \beta) + \left(\frac{\operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg} \beta} \right)^2, \\
\theta &= 90^\circ - \alpha.
\end{aligned}$$

Расчеты для УРАЛ-4320

$$\theta = 90^\circ - \alpha = 90^\circ - 84^\circ = 6^\circ,$$

$$\begin{aligned}
J_{\omega}^{(5)} &= \frac{J_y}{\operatorname{tg}^2 0,414^\circ + \operatorname{tg}^2 6^\circ + 1} \left[\operatorname{tg}^2 6^\circ (1 + \sin^2 0,414^\circ + \right. \\
&+ \cos^2 0,414^\circ \cdot \sin^2 1^\circ) + \operatorname{tg}^2 3,007^\circ \cdot (2 \cos^2 0,414^\circ + \\
&+ 3 \cos^2 1^\circ \cdot \sin^2 0,414^\circ) + \cos^2 0,414^\circ \cdot (1 + \cos^2 1^\circ) + \\
&+ \operatorname{tg} 3,007^\circ \cdot \operatorname{tg} 6^\circ \cdot \sin 0,828^\circ \cdot (\cos^2 1^\circ \cdot \sin 1^\circ \cdot \cos 0,414^\circ + \\
&+ \sin 2^\circ + \cos^2 1^\circ - 2) \left. \right] = J_y \cdot 1,025.
\end{aligned}$$

$$J_{O_1 O_2}^{(5)} = J_y \cdot 1,025 + 161 \cdot 0,225^2 \cos^2 6^\circ = J_y \cdot 1,025 + 8,062.$$

Расчеты для ЗиЛ-131

$$\theta = 90^\circ - \alpha = 90^\circ - 85^\circ = 5^\circ.$$

$$\begin{aligned}
J_{\omega}^{(5)} &= \frac{J_y}{\operatorname{tg}^2 0,258^\circ + \operatorname{tg}^2 5^\circ + 1} \left[\operatorname{tg}^2 5^\circ (1 + \sin^2 0,258^\circ + \right. \\
&+ \cos^2 0,258^\circ \cdot \sin^2 1^\circ) + \operatorname{tg}^2 3,003^\circ \cdot (2 \cos^2 0,258^\circ + \\
&+ 3 \cos^2 1^\circ \cdot \sin^2 0,258^\circ) + \cos^2 0,258^\circ \cdot (1 + \cos^2 1^\circ) + \\
&+ \operatorname{tg} 3,003^\circ \cdot \operatorname{tg} 5^\circ \cdot \sin 0,516^\circ \cdot (\cos^2 1^\circ \cdot \sin 1^\circ \cdot \cos 0,258^\circ + \\
&+ \sin 2^\circ + \cos^2 1^\circ - 2) \left. \right] = J_y \cdot 1,004.
\end{aligned}$$

$$J_{O_1 O_2}^{(5)} = J_y \cdot 1,004 + 131 \cdot 0,152^2 \cos^2 5^\circ = J_y \cdot 1,004 + 3,0036.$$

Заключение

1. Краткий обзор литературы [1 – 16] показал, что окончательно не установлена степень влияния углов установки колеса и наклона шкворня на критерии: износ шин, усилие на рулевом колесе в случае поломки или отключения усилителя руля, устойчивость и безопасность движения, плавность хода. Для определения этих динамических критериев нужны формализованные зависимости влияния углов развала, схождения, поперечного и продольного наклона оси шкворня.

2. В качестве исходной информации для вывода механико-математическими методами зависимостей моментов инерции колеса с шиной в функции углов установки колеса и наклона шкворня являются формулы теоретической механики и аналитической геометрии для:

- вычисления момента инерции твердого тела, которое в первом приближении обладает центральной симметрией, относительно любой оси, проходящей через начало ортогональной декартовой системы координат;

- установления связи косинуса угла φ между двумя прямыми, выходящими из начала ортогональной декартовой системы координат с углами наклона $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1, \quad i = 1, 2$ к этим осям.

3. Получено пять формализованных зависимостей влияния углов установки колеса и наклона шкворня на моменты инерции колеса с шиной относительно оси шкворня, по которым выполнены расчеты, устанавливающие численную величину влияния углов развала, схождения, поперечного и продольного наклона оси шкворня на величину моментов инерции колес СНОП УРАЛ-4320 и ЗиЛ-131 относительно оси шкворня, – с увеличением числа учтенных углов моменты инерции колес относительно осей шкворней возрастают.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гурвич, Ю. А. Обучающий и контролирующий комплекс программ на «Mathcad 2000 pro» для исследования влияния значений геометрических параметров различных конструкций рулевых трапеций на износ шин / Ю. А. Гурвич // Теоретическая и прикладная механика: сб. науч. трудов. – Минск : Технопринт, 2002. – С. 65–72.
2. Гришук, А. К. Расчет координат геометрического центра колеса автомобиля / А. К. Гришук // Транспорт. – 2010. – № 1. – С. 50–53.
3. Шаршуков, К. Г. Влияние динамических факторов на характеристики бокового сцепления шин в стендовых условиях / К. Г. Шаршуков, С. С. Капралов // Транспорт. Транспортные и технологические машины. – 2014. – № 5 (34). – С. 45–52.
4. Петрищев, И. М. Исследование влияния дисбаланса колес на возникновение колебаний в системах подвески и рулевого управления различных моделей машин / И. М. Петрищев // Технические науки. Механизация сельского хозяйства. – 2014. – № 1. – С. 68–76.
5. Гурвич, Ю. А. Экспериментально-аналитический метод параметрической идентификации процесса качения колеса с шиной / Ю. А. Гурвич // Авиационный вестник. – 2021. – № 5. – С. 29–45.
6. Блинова, Т. Б. Разработка методики и расчет основных параметров рулевых приводов различных типов по критерию минимальной установленной мощности / Т. Б. Блинова // Системы управления движущимися объектами. – 2009. – № 5. – С. 118–130.
7. Блинова, Т. Б. Математические модели и алгоритмы параметрического синтеза исполнительных механизмов рулевых приводов маневренного самолета / Т. Б. Блинова // Сложные технические системы управления и информационно-управляющие комплексы. – 2009. – № 4. – С. 142–152.
8. Мурог, И. А. Обоснование параметров конструкции рулевого привода задних управляемых колес трехосных машин / И. А. Мурог // Наука и образование. – 2012. – № 7. – С. 345–351.
9. Сазонов, И. С. Кинематика шестизвенной рулевой трапеции и оптимизация ее параметров / И. С. Сазонов // Транспорт. – 2014. – № 3 (20). – С. 40–45.
10. Беляков, В. В. Расчет углов поворота управляемых колес автомобиля с учетом увода / В. В. Беляков // Машиностроение и транспорт: теория, технологии, производство. – 2019. – № 2 (125). – С. 156–161.
11. Рязанцев, В. И. Эффективность применения активного управляемого схождения колес автомобилей / В. И. Рязанцев // Машиностроение. – 2006. – № 10. – С. 42–53. Рязанцев, В. И. Алгоритмы активного управления углами схождения колес автомобиля в движении / В. И. Рязанцев // Машиностроение. – 2014. – № 10 (655). – С. 31–40.
12. Лебедев, Б. С. К вопросу о расчете нагруженности рулевого управления автомобиля / Б. С. Лебедев // Автомобили и автомобильное хозяйство. – 2007. – № 2. – С. 16–19.
13. Скрыпников, А. В. Исследование работы рулевых управлений с гидроусилителями / А. В. Скрыпников // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 3–11.
13. Гурвич, Ю. А. Многокритериальное проектирование управляемых неразрезных осей грузовых автомобилей / Ю. А. Гурвич // Сборник научных статей военной академии Республики Беларусь. – 2018. – № 35. – С. 72–80.
14. Гурвич, Ю. А. Обоснование методики и программного продукта многокритериальной оптимизации параметров различных конструкций рулевых трапеций семейства грузовых автомобилей / Ю. А. Гурвич // Машиностроение: респ. межведомств. сб. науч. тр. – Минск : БНТУ, 2018. – Вып. 31. – С. 153–167.

REFERENCES

1. Gurchich, Y. A. Training and controlling complex of programs on "Mathcad 2000 pro" for the study of the influence of the values of geometric parameters of various constructions of steering trapezoids on the wear of tires / Y. A. Gurchich // Theoretical and applied mechanics: sb. науч. works. – Minsk : Technoprint, 2002. – P. 65–72.
2. Grischuk, A. K. Calculation of the coordinates of the geometric center of the wheel of the automobile / A. K. Grischuk // Transport. – 2010. – № 1. – P. 50–53.
3. Sharshukov, K. G. Influence of dynamic factors on the characteristics of the side clutch of tires in stand conditions / K. G. Sharshukov, S. S. Kapralov // Transport. Transport and technological machines. – 2014. – № 5 (34). – P. 45–52.
4. Petrishchev, I. M. Issledovanie raspraviya imbalance koles na oscillation v oscillation v sistemakh suspension i steering svinekh raznykh modelov mashinskii / I. M. Petrishchev // Tekhnokhnicheskie nauki. Mechanization of agriculture. – 2014. – № 1. – P. 68–76.
5. Gurchich, Y. A. Experimental-analytical method of parametric identification of the process of rolling wheels with a tire / Y. A. Gurchich // Aviatsonnyi vestnik. – 2021. – № 5. – P. 29–45.
6. Bliznova, T. B. Development of methods and calculation of the main parameters of steering drives of various types according to the criterion of the minimum installed power / T. B. Bliznova // Control systems of moving objects. – 2009. – № 5. – P. 118–130.
7. Bliznova, T. B. Mathematical models and algorithms of parametric synthesis of executive mechanisms of rudder drives of maneuverable aircraft / T. B. Bliznova // Complex technical control systems and information-falling complexes. – 2009. – № 4. – P. 142–152.
8. Murog, I. A. Substantiation of the parameters of the design of the helmsman drive rear controlled wheels of three-axle machines / I. A. Murog // Nauka i obrazovanie. – 2012. – № 7. – P. 345–351.
9. Sazonov, I. S. Kinematika six-link helmsman's trapezium and optimization of its parameters / I. S. Sazonov // Transport. – 2014. – № 3 (20). – P. 40–45.
10. Belyakov, V. V. Calculation of the corners of the turn of the controlled wheels of the automobile with the account of the uvod / V. V. Belyakov // Mashinostroenie i transport: teoriya, tekhnologii, production. – 2019. – № 2 (125). – P. 156–161.
11. Ryazantsev, V. I. Efficiency of application of active controlled spleniya koles avtomobilii / V. I. Ryazantsev // Mashinostroenie. – 2006. – № 10. – P. 42–53.
12. Ryazantsev, V. I. Algorithms of active management of the corners of the descent of the wheels of the automobile in motion / V. I. Ryazantsev // Mashinostroenie. – 2014. – № 10 (655). – P. 31–40.
13. Lebedev, B. S. K voprosu o calculation nagruznosti steering avtomobiliya / B. S. Lebedev // Avtomobilii i avtomobilnoe khozyaistvo. – 2007. – № 2. – P. 16–19.
14. Skrypnikov, A. V. Issledovanie rabota rulevykh otravleniya s gidroasilitelii / A. V. Skrypnikov // Sovremennye problemy nauki i obrazovanie. – 2014. – № 6. – P. 3–11.
15. Gurchich, Y. A. Multi-criteria design of controlled non-cut axes of trucks / Y. A. Gurchich // Collection of scientific articles of the military academy of the Republic of Belarus. – 2018. – № 35. – P. 72–80.
16. Gurchich, Y. A. Justification of the methodology and the program product of the multi-criteria optimization of the parameters of various constructions of the steering trapezoids of the truck family / Y. A. Gurchich // Mashinostroenie: rep. interdepartmental. sb. науч. tr. – Minsk : BNTU, 2018. – Vol. 31. – P. 153–167.

Статья поступила в редакцию
04.04.2023

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УГЛОВЫХ ФЛУКТУАЦИЙ НА ЗАТРАТЫ МОЩНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПОЛЕТЕ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЕ

Рожков Игорь Владимирович – кандидат технических наук, доцент, военнослужащий учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
7528972@mail.ru

Igor Rozhkov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Serviceman of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
7528972@mail.ru

Султанова Алина Навальджановна – магистрант учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь

Alina Sultanova – Master's Degree student of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus

Аннотация: в статье рассматривается методика оценки затрат мощности двигателя беспилотного летательного аппарата на преодоление силы сопротивления, обусловленной угловыми флуктуациями при полете в турбулентной атмосфере. Проводится сравнительный анализ результатов приближенного аналитического расчета и имитационного компьютерного моделирования. Анализ показывает значительную степень совпадения результатов компьютерного моделирования с результатами аналитических расчетов.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, турбулентная атмосфера, флуктуации пространственного угла атаки, затраты мощности.

Abstract: the article discusses a technique for estimating the power consumption of an unmanned aerial vehicle engine to overcome the drag force caused by angular fluctuations when flying in a turbulent atmosphere. A comparative analysis of the results of an approximate analytical calculation and simulation computer modeling is carried out. The analysis shows a significant degree of coincidence of the results of computer modeling with the results of analytical calculations.

Keywords: unmanned aerial vehicle, turbulent atmosphere, spatial angle of attack fluctuations, power consumption.

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БЛА) и их комплексы на сегодняшний день являются наиболее перспективными, динамично развивающимися, уникальными системами военного и гражданского назначения.

Одним из важнейших требований, предъявляемых к БЛА, является возможность выполнения поставленных задач в автономном полете в течение длительного времени. Ограниченный запас энергии на борту беспилотного летательного аппарата вызывает необходимость ее рационального использования в процессе полета. Основная часть энергии аккумуляторных батарей расходуется в двигателе БЛА на преодоление силы аэродинамического сопротивления (при использовании двигателей внутреннего сгорания запас энергии определяется запасом топлива на борту БЛА). Поэтому снижение силы лобового сопротивления является одним из факторов, влияющих на дальность полета БЛА.

При полете в турбулентной атмосфере сила лобового сопротивления увеличивается за счет индуктивного сопротивления, обусловленного флуктуациями пространственного угла атаки. Дисперсия угловых флуктуаций зависит как от уровня случайных возмущений, обусловленных турбулентностью атмосферы, так и от динамических свойств контура стабилизации БЛА. Перспективным направлением развития систем управления БЛА является разработка робастных контуров стабилизации с пониженным уровнем угловых флуктуаций летательного аппарата. Поэтому актуальной является задача оценки влияния уровня угловых флуктуаций на такие важные тактические характеристики БЛА как дальность или время автономного полета.

В данной статье приведена методика оценки относительных потерь мощности двигателя БЛА на преодоление силы лобового сопротивления, обусловленной флуктуационной составляющей пространственного угла атаки.

Постановка задачи

При рассмотрении аналитической методики оценки потерь мощности двигателя БЛА при полете в турбулентной атмосфере были приняты следующие допущения:

- аэродинамическая схема БЛА — нормальная (классическая, с прямым крылом, оперением с одним килем и стабилизатором, в качестве рулевых поверхностей используются руль высоты, руль направления, элероны);

- БЛА совершает горизонтальный прямолинейный полет с постоянной скоростью в турбулентной атмосфере;

- скорость полета БЛА V идеально выдерживается системой стабилизации скорости. Переходные процессы в контуре регулирования скорости не учитываются;

- за счет действия турбулентной атмосферы БЛА совершает случайные колебания вокруг центра масс, в результате которых случайным образом изменяется угол атаки α . В этом случае угол атаки может быть представлен суммой слагаемых $\alpha = \alpha_0 + \alpha_\phi$, где α_0 — регулярная составляющая угла атаки, необходимая для компенсации веса БЛА, α_ϕ — флуктуационная составляющая, обусловленная турбулентностью атмосферы;

- флуктуации пространственного угла атаки приводят к флуктуациям силы лобового сопротивления, величина среднее квадратическое отклонение (СКО) которых является сравнительно малой. Поэтому коэффициент полезного действия винта η_v принимается постоянным.

Постановка задачи

Эффективная мощность винта, представляющая собой работу, совершаемую в единицу времени, определяется соотношением [1]:

$$N_{\text{эф}} = TV, \quad (1)$$

где T — сила тяги винта;

V — скорость полета БЛА.

Тогда полная мощность, потребляемая от источника питания и затрачиваемая на вращение винта, равна:

$$N_{\text{п}} = \eta_v \eta_{\text{дв}} TV, \quad (2)$$

где $\eta_{\text{дв}}$ — коэффициент полезного действия двигателя, принимаемый также постоянным.

С учетом допущений об идеальном регулировании скорости полета можно считать, что тяга винта в любой момент времени равна силе лобового сопротивления [2]:

$$X = (C_{x0} + C_y^a \alpha^2) q S, \quad (3)$$

где C_{x0} — коэффициент лобового сопротивления БЛА при нулевом угле атаки;

C_y^a — производная коэффициента подъемной силы;

q — скоростной напор набегающего потока;

S — характерная площадь БЛА (как правило, площадь крыла).

Подставляя соотношение (3) в (2) (при условии, что $T = X$), получаем

$$\begin{aligned} N_{\text{п}} &= \eta_v \eta_{\text{дв}} V (C_{x0} + C_y^a \alpha^2) q S = \\ &= \eta_v \eta_{\text{дв}} V (C_{x0} + C_y^a \alpha_0^2) q S + \\ &+ \eta_v \eta_{\text{дв}} V C_y^a (2\alpha_0 \alpha_\phi + \alpha_\phi^2) q S, \end{aligned} \quad (4)$$

Первое слагаемое формулы (4) представляет собой регулярную составляющую затрат мощности двигателя при горизонтальном полете

$$N_1 = \eta_v \eta_{\text{дв}} V (C_{x0} + C_y^a \alpha_0^2) q S.$$

Второе слагаемое $N_2 = \eta_v \eta_{\text{дв}} V C_y^a (2\alpha_0 \alpha_\phi + \alpha_\phi^2) q S$ определяет дополнительную составляющую затрат мощности двигателя при движении БЛА в турбулентной атмосфере.

Дополнительные затраты мощности представляют собой случайный процесс из-за наличия флуктуационной составляющей угла атаки. Средние затраты определяются соотношением

$$\begin{aligned} N_2 &= M(N_2) = \\ &= \eta_v \eta_{\text{дв}} V q S C_y^a M(2\alpha_0 \alpha_\phi + \alpha_\phi^2) = \\ &= \eta_v \eta_{\text{дв}} V q S C_y^a \sigma_\alpha^2, \end{aligned} \quad (5)$$

где σ_α^2 — дисперсия флуктуаций угла атаки;

$M(*)$ — операция вычисления математического ожидания.

С учетом соотношения (5) относительные средние затраты мощности на преодоление силы дополнительного сопротивления при движении БЛА в турбулентной атмосфере равны:

$$\delta N = \frac{\hat{N}_2}{\hat{N}_1} = \frac{C_y^a \alpha_0^2}{(C_{x0} + C_y^a \alpha_0^2) + C_y^a \alpha_0^2} = \frac{K \sigma_\alpha^2}{1 + K \sigma_\alpha^2}, \quad (6)$$

$$\text{где } K = \frac{C_y^a}{C_{x0} + C_y^a \alpha_0^2}.$$

Таким образом, относительные средние потери мощности, обусловленные турбулентностью атмосферы, зависят от дисперсии флуктуаций угла атаки, а также от отношения производной коэффициента подъемной силы и коэффициента лобового сопротивления БЛА.

Дополнительные затраты мощности на преодоление влияния флуктуаций угла атаки приводят к снижению времени, а, следовательно, и максимальной дальности полета. При фиксированном запасе энергии источника питания, выделенном на выполнение работы по перемещению БЛА, выполняется условие

$$N_1 t_1 = \hat{N}_{\text{п}} t_2, \quad (7)$$

где t_1, t_2 — максимальное время полета БЛА при отсутствии и наличии флуктуаций угла атаки.

С учетом соотношения (7) относительное уменьшение максимального времени полета БЛА в турбулентной атмосфере будет равно:

$$\delta t = \frac{t_1 - t_2}{t_1} = 1 - \frac{N_1}{N_{\pi}} = \frac{N_2}{N_{\pi}} = \delta N. \quad (8)$$

Для относительного уменьшения дальности полета БЛА в турбулентной атмосфере также будет справедливо соотношение, аналогичное (8): $\delta D = \delta N$.

Графики зависимости относительного значения средних потерь мощности при движении БЛА в турбулентной атмосфере от СКО флуктуаций угла атаки для различных значений коэффициента K представлены на рисунке 1.

Из графиков видно, что при значении коэффициента $K = 10$ и увеличении СКО флуктуаций угла атаки до 0,1 рад величина относительного значения средних потерь мощности увеличивается и может достигать 10 %.

Значения средних относительных затрат мощности двигателя δN на преодоление дополнительного сопротивления, обусловленного флуктуациями угла атаки, от СКО флуктуаций, полученные в результате расчета по формуле (6), представлены в таблице 1 [5].

Проверка предложенной аналитической методики оценки потерь мощности БЛА при полете в турбулентной атмосфере проводилась путем компьютерного моделирования с использованием пакета расширения Simulink программы MATLAB (№ SKR/1843-234) [6].

В качестве имитационной математической модели пространственного движения БЛА использовалась модель, рассмотренная в работе [4]. В качестве модели турбулентной атмосферы использовалась модель, рассмотренная в работе [3]. Моделировался полет БЛА со скоростью $V = 30$ м/с на высоте 300 м, время полета – 1 час.

Структурная схема блока вычисления относительных затрат мощности двигателя БЛА на преодоление составляющей силы лобового сопротивления, обусловленной флуктуациями угла атаки, представлена на рисунке 2. На рисунке 2 обозначены: m – масса БЛА, q – скоростной напор, ρ – плотность воздуха на высоте полета, S – характерная площадь БЛА.

Входными величинами блока являются значения регулярной α_0 и флуктуационной α_{ϕ} составляющих угла атаки. Указанные значения составляющих угла атаки определяются в модели полета БЛА, представленной в работе [4].

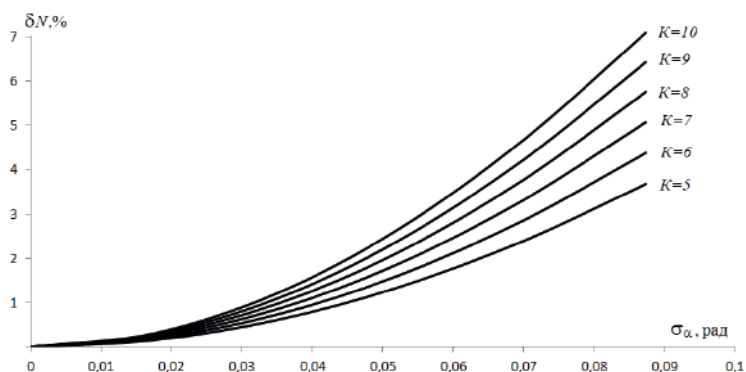


Рисунок 1 — Графики изменения относительного значения средних потерь мощности при движении БЛА в турбулентной атмосфере

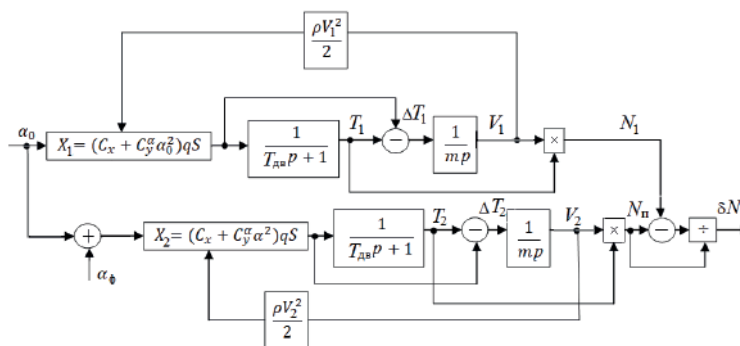


Рисунок 2 — Структурная схема блока вычисления относительных потерь мощности

В блоке вычисления дополнительных затрат мощности при движении БЛА в турбулентной атмосфере параллельно определяется мощность N_1 , затрачиваемая двигателем при отсутствии флуктуаций угла атаки, и мощность N_{π} , затрачиваемая при угловых флуктуациях. Мощность рассчитывается с учетом равенства тяги двигателя и силы лобового сопротивления ($T = X$) в установившемся режиме. Учет инерционности двигателя путем введения аperiodического звена с постоянной времени $T_{\text{дв}}$ приводит к тому, что в динамике при изменениях силы лобового сопротивления возникают флуктуации тяги ΔT . Флуктуации тяги двигателя приводят к возникновению флуктуаций скорости. Таким образом, имитационная модель учитывает дополнительные факторы, которые не учитываются в аналитической модели. Мощность двигателя вычисляется в соответствии с соотношением (1).

Результат компьютерного моделирования изменения затрат мощности двигателя БЛА представлен на графиках (рисунок 3).

Таблица 1 — Средние относительные затраты мощности двигателя

σ_{α} , рад	δN , % ($K = 5$)	δN , % ($K = 6$)	δN , % ($K = 7$)	δN , % ($K = 8$)	δN , % ($K = 9$)	δN , % ($K = 10$)
0,017	0,15	0,18	0,21	0,24	0,26	0,31
0,035	0,61	0,73	0,85	0,97	1,09	1,21
0,052	1,34	1,61	1,87	2,13	2,39	2,65
0,070	2,39	2,86	3,32	3,77	4,22	4,67
0,087	3,68	4,38	5,07	5,76	6,43	7,09

Значения средних относительных затрат мощности двигателя δN от СКО флуктуаций пространственного угла атаки, полученные в результате моделирования, представлены в таблице 2. Данные результаты соответствуют значению коэффициента $K = 9$, которое использовано в модели полета БЛА.

При увеличении дисперсии угловых флуктуаций и коэффициента K увеличивается значение относительных средних потерь мощности двигателя БЛА, затраченных на преодоление дополнительной силы лобового сопротивления, обусловленной флуктуациями угла атаки (рисунок 1, таблицы 1, 2). Коэффициент K является прямо пропорциональным коэффициенту аэродинамического качества БЛА. Сравнение результатов аналитического расчета и численного моделирования показывает хорошее их совпадение (средняя величина относительной погрешности не превышает 11 %).

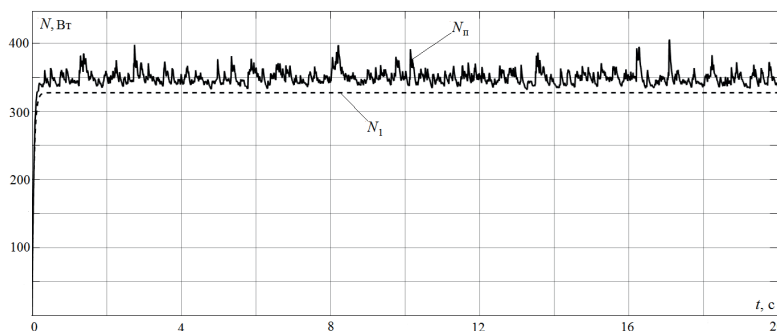


Рисунок 3 — Графики затрат мощности двигателя, полученные путем компьютерного моделирования

Таблица 2 — Относительные средние потери мощности, полученные при моделировании

σ_a , рад	0,017	0,035	0,052	0,07	0,087
δN , % ($K = 9$)	0,32	0,96	2,82	4,62	6,43

Заключение

1. Разработанная аналитическая методика позволяет получить приближенную оценку относительного значения дополнительных затрат мощности двигателя БЛА на преодоление силы лобового сопротивления, обусловленной флуктуациями угла атаки.
2. Относительные затраты мощности двигателя БЛА на преодоление дополнительной силы лобового сопротивления зависят от отношения производной коэффициента подъемной силы и коэффициента лобового сопротивления БЛА, а также от СКО угловых флуктуаций угла атаки. Для значения СКО $\sigma_a = 0,087$ рад и $K = 10$ относительные затраты превышают 7 %.

3. Результаты аналитических расчетов величины дополнительных относительных затрат мощности двигателя БЛА, а также расчетов, полученных с помощью компьютерного моделирования, являются почти идентичными.
4. Для оценки влияния динамических характеристик контуров угловой стабилизации БЛА на такие показатели как дальность и продолжительность полета БЛА может быть использована методика оценки затрат мощности БЛА при полете в турбулентной атмосфере.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аэромеханика: уч. пособие / под ред. А. И. Желанникова. – М.: ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 2007. – 396 с.
2. Биард, Р.У. Малые беспилотные летательные аппараты: Теория и практика / Р.У. Биард, Т.У. Мак-Лэйн. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2015. – 312 с.
3. Влияние ветра на систему угловой стабилизации беспилотного летательного аппарата / А. А. Санько, И. В. Рожков, А. А. Шейников // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. – 2019, № 1. – С. 11–17.
4. Рожков, И. В. Преобразование математической модели пространственного движения БЛА для решения задач анализа и синтеза контуров стабилизации и управления / В. А. Малкин, И. В. Рожков // Вест. ВАРБ. – 2018. – № 1. – С. 46–55.
5. Рожков, И. В. Имитационная математическая модель потерь мощности беспилотного летательного аппарата при полете в турбулентной атмосфере / И. В. Рожков, Д. А. Дьяков, И. А. Лукьянчук // Совершенствование обеспечения полетов авиации: тезисы докладов XI военно-научной конференции курсантов и молодых ученых БГАА, 30.04.2021. – Минск, 2021. – С. 52–54.
6. Щербakov, В. С. Основы моделирования систем автоматического регулирования и электротехнических систем в среде Matlab Simulink: учебное пособие / В. С. Щербakov, А. А. Руппель, В. А. Глушеч. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2003. – 160 с.

REFERENCES

1. Aeromechanics: account. allowance / Edited by A. I. Zhelannikova. – M.: VVIA im. N. E. Zhukovsky, 2007. – 396 p.
2. Biard, R. Small unmanned aerial vehicles: theory and practice / R. Biard, T. McLain. – M.: TECHNOSPHERE, 2015. – 312 p.
3. Sanko A. A., Rozhkov I. V., Sheinikov A. A. Influence of wind on the system of angular stabilization of an unmanned aerial vehicle // Crede Experto: transport, society, education, language. – 2019, No. 1. – P. 11–17.
4. Rozhkov, I. V. Transformation of the mathematical model of UAV spatial motion for solving problems of analysis and synthesis of stabilization and control loops / V. A. Malkin, I. V. Rozhkov. // Bulletin of the Military Academy of the Republic of Belarus. – 2018. – No. 1. – P. 46–55.
5. Rozhkov, I. V. Simulation mathematical model of power losses of an unmanned aerial vehicle during flight in a turbulent atmosphere / I. V. Rozhkov, D. A. Dyakov, I. A. Lukyanchuk // Improving aviation flight support: abstracts of the XI Military Scientific Conference of cadets and young scientists of the BGAA, 30.04.2021. – Minsk, 2021. – P. 52–54.
6. Shcherbakov, V. S., Ruppel, A. A., Glushets, V. A. Fundamentals of modeling automatic control systems and electrical systems in the Matlab Simulink environment: tutorial. – Omsk: SibADI Publishing House, 2003. – 160 p.

Статья поступила в редакцию
20.04.2023

$$P = UI$$

$$I = IA$$

$$P = I^2 R$$

$$\frac{B}{\mu_0} I = IN$$

$$(IN)_0 = \frac{IN}{i}$$

$$I = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$$

$$I = \epsilon r A$$

$$B = R \frac{I}{d}$$

$$B = K \frac{I}{d}$$

$$BI = 2\sqrt{I}r = IN$$



$$W_m = 1/2 LI^2$$

$$\sum \frac{B}{\mu} I = \sum IN$$

$$B = K \frac{I}{d}$$

$$a + b = c$$

$$BI = \mu_0 I$$

$$R = U/I$$

$$\mathcal{E}_1 = I_1 R_1 + IR$$

$$W = Pt = UIc_{pt}$$

$$I = 2\sqrt{I}r$$

$$\mathcal{E} = M \frac{di}{dt}$$

ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ



ПСИХОЛОГИЧЕСКАЯ ГОТОВНОСТЬ К ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ КУРСАНТОВ ГОСУДАРСТВЕННОЙ АВИАЦИИ

Тюпин Роман Леонидович – военнослужащий учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь

Raman Tjupin – Serviceman of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus

Аннотация: статья посвящена анализу развития и формирования психологической готовности к профессиональной деятельности курсантов военного факультета в учреждении образования «Белорусская государственная академия авиации» по специальности: «Беспилотные авиационные комплексы». Проведено исследование свойств личности с целью получения сравнительной информации о развитии личностных, интеллектуальных, психофизических профессионально важных качеств курсантов 1 и 4 курса. Показано, что психологическая поддержка курсантов – будущих военных авиационных специалистов, на всех этапах обучения является необходимой и позволяет сформировать такие профессионально значимые психофизиологические, интеллектуальные и личностные качества как психологическая и эмоциональная устойчивость в стрессовых ситуациях, оперативное мышление, интерес к технике и др.

Ключевые слова: психологическая готовность, профессионально важные качества, общее интеллектуальное развитие, адаптационный процесс, военно-профессиональная направленность.

Abstract: the article analyzes the development and formation of psychological readiness for professional activity of cadets of the military faculty in the educational institution "Belarusian State Aviation Academy" in the specialty: "Unmanned aerial systems". A study of personality traits was carried out in order to obtain comparative information about the development of personal, intellectual, psychophysical professionally important qualities of cadets of the 1st and 4th year of study. It is shown that the psychological support of cadets - future military aviation specialists, is necessary at all stages of training and allows the formation of such professionally significant psycho-physiological, intellectual and personal qualities as psychological and emotional stability in stressful situations, operational thinking, interest in technology, etc.

Keywords: psychological readiness, professionally important qualities, general intellectual development, adaptation process, military professional orientation.

Введение

Авиационные технологии и авиация как отрасль науки и техники является одним из передовых направлений развития экономики государства, что обуславливает необходимость разработки новых и модернизации существующих подходов к профессиональной подготовке авиационного специалиста, способствующих развитию его профессионально важных качеств и, как следствие, совершенствованию всей системы психолого-педагогического сопровождения образовательного процесса в целом [1]. Ведь успешность профессиональной деятельности любого будущего специалиста определяется уровнем

развития его профессионально важных качеств.

С точки зрения психологической классификации профессий, согласно В. А. Бодрову [2], деятельность авиационного специалиста включает целый ряд различных классификационных признаков, основными из которых представляются следующие:

1) характер рабочей нагрузки субъекта деятельности и его усилий по реализации трудовых задач: по этому признаку считается, что труд авиационного специалиста осуществляется за счет физической, интеллектуальной, личностной и других составляющих целостного организма человека;

2) характеристики цели труда, рабочей нагрузки, организации трудового процесса: труд авиаци-

онного специалиста признается операторским с элементами творческого, динамично-статического и однообразного;

3) условия труда: авиационным специалистам, в зависимости от конкретных направлений деятельности, чаще всего приходится трудиться в необычных, а иногда неблагоприятных и экстремальных условиях;

4) форма организации деятельности: строго регламентированная, индивидуально-коллективная работа [3, 4].

Очевидно, что требования к профессионально важным качествам авиационного специалиста, а именно, оператора беспилотного летательного аппарата (БЛА) весьма специфичны, что обосновывает актуальность исследований в этом направлении.

Настоящая работа посвящена изучению процесса формирования профессионально важных качеств будущих операторов БЛА в период с первого по четвертый год обучения под влиянием образовательной среды.

Исследование основывается на использовании теоретической методологической концепции профессионального психологического отбора и психологического сопровождения подготовки военного летчика Д. В. Гандера, В. А. Пономаренко и др., в рамках которой прогноз профессиональной надежности и адаптации к профессиональной деятельности осуществляется на основании оценки профессионально важных качеств военного летчика, а в нашем случае — оператора беспилотного летательного аппарата.

В работе приведены результаты исследования личностной группы профессионально важных качеств курсантов первого и четвертого курсов.

Разумеется, что свойства личности не являются постоянными, а подвергаются изменениям в процессе жизни индивида [3]. Изменяются черты характера, уровень самооценки личности в ходе развития военно-профессиональных, волевых качеств курсантов.

Настоящее исследование направлено на установление взаимосвязи уровня личностных свойств, их развития с развитием профессиональных способностей и повышением уровня профессионализма.

Формирование профессионального самосознания у курсантов положительным образом сказывается на стремлении к получению специальных знаний и личностном самосовершенствовании. Принципиально было узнать, на какой стадии подготовки курсанты государственной авиации намеренно тяготеют к развитию интеллектуальных профессионально важных качеств и способны к ориентированному формированию психологической готовности к профессиональной деятельности с помощью психологического сопровождения [4].

Психофизиологические качества

Методика «Прогноз», разработанная в Военно-медицинской академии имени С. М. Кирова, позволяет не только выявить конкретные

предболезненные признаки личностных нарушений, но и оценить вероятность их прогрессирования и проявления в поведении и профессиональной деятельности человека. Особенно информативной эта методика считается при отборе лиц, пригодных для работы или службы в трудных, непредсказуемых условиях, где к человеку предъявляются повышенные требования. В названной методике особое значение придается так называемой нервно-психической неустойчивости, показывающей риск дезадаптации личности в условиях стресса, т. е. тогда, когда система эмоционального отражения функционирует в критических условиях, вызываемых внешними, равно как и внутренними факторами.

Методика применяется как при профилактике, так и при диагностике эмоционального состояния и способствует определению в изучаемой группе лиц с признаками нервно-психической неустойчивости, которая является отражением одновременно психического и соматического уровня здоровья индивида. Методика содержит 84 вопроса, на каждый из которых предлагается дать ответ «да» или «нет».

Исследование проводилось с привлечением курсантов 1-го курса, т. е. юношей в границах возрастной группы 17–18 лет. Именно эта группа вызывает интерес в связи с тем, что они перешли из социального статуса школьников сразу же

в статус курсантов военного факультета и еще проходят период адаптации к новым условиям проживания и обучения в учреждении образования.

В тестировании на определение эмоциональной устойчивости приняло участие 32 курсанта 1-го курса. По результатам тестирования в группе риска находится 8 курсантов, у 9 человек в экстремальных ситуациях вероятны эмоциональные срывы, 15 курсантов являются эмоционально устойчивыми. Результаты проведенного тестирования представлены на рисунке 1.

Полученные данные позволяют утверждать, что 53 % курсантов в первый год обучения не являются готовыми к несению службы при повышенных стрессовых условиях, у 25 % тестируемых высока вероятность эмоциональных срывов, 28 % курсантов в стрессовых ситуациях также могут становиться эмоционально нестабильными и только 47 % являются эмоционально устойчивыми и готовы к учебе, несению службы при эмоциональных факторах.

В тестировании на определение эмоциональной устойчивости также приняло участие 32 курсанта 4-го курса. По результатам тестирования в группе риска находится 2 курсанта, у 3 человек в экстремальных ситуациях вероятны эмоциональные срывы. Эмоционально устойчивыми являются 27 курсантов (рисунок 2).

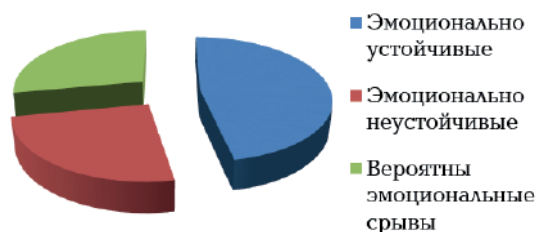


Рисунок 1 — Результаты тестирования курсантов первого курса по методике «Прогноз»



Рисунок 2 — Результаты тестирования курсантов четвертого курса по методике «Прогноз»

Курсанты четвертого года обучения дали более компетентные ответы на поставленные вопросы, что говорит о целенаправленной, структурированной и систематизированной работе по улучшению психофизиологических качеств будущих специалистов по работе с беспилотными авиационными комплексами.

Изменение образа жизни, социального статуса, тесное взаимодействие с новыми людьми влекут за собой тяжелые психологические нагрузки в период адаптации к новым условиям и, как следствие, дестабилизацию эмоционального состояния. Для установления исходных параметров эмоционального состояния курсантов, повышения их эмоциональной устойчивости, смягчения процесса адаптации к новым условиям, необходимо включать в образовательные программы систематическую работу психологов с курсантами, входящими в группу риска. При этом требуется включение в работу методик, направленных на ускорение адаптации курсантов к условиям учебы и службы, приведение их представлений и ожиданий к реальным условиям жизнедеятельности, что поможет быстрее стабилизировать эмоциональное состояние и будет способствовать формированию эмоциональной устойчивости входящих в группу риска.

Интеллектуальные качества

Для исследования степени концентрации и устойчивости внимания целесообразно использовать методику «Корректирующая проба», которая относится к бланковым тестам скорости и предложена Б. Бурдоном еще в 1895 году. Корректирующая проба относится к числу наиболее известных и давно применяемых в экспериментальной и прикладной психологии методов оценки внимания и психомоторных особенностей. Различные модификации корректирующей пробы широко применяются в области клинической, профессиональной, школьной психодиагностики благодаря простоте и надежности отражения особенностей внимания, функционального состояния, работоспособности испытуемого.

Методика заключается в исследовании с помощью специальных бланков с рядами расположенных

в случайном порядке букв. Испытуемый просматривает ряд и вычеркивает определенные буквы в соответствии с указанными в инструкции требованиями. Результаты пробы оценивают по количеству пропущенных (незачеркнутых) букв или других знаков, а также по времени выполнения заданного количества строк.

Важным показателем является характеристика качества и темпа выполнения (выражается числом проработанных строк и количеством допущенных ошибок за каждые 30- или 60-секундные интервалы работы). Корректирующая проба позволяет дать оценку темпа психомоторной деятельности, работоспособности и устойчивости к монотонной деятельности, требующей постоянного сосредоточения внимания.

Обработка результатов тестирования производится с помощью формул, связывающих уровень концентрации с темпом и переключаемостью внимания.

Результаты тестирования, полученные по методике «Корректирующая проба», представлены на рисунке 3. Испытанию подверглись те же группы курсантов первого и четвертого курсов.

Низкие значения уровня развития внимания отсутствуют, как у первого, так и у четвертого курсов. Средние значения (8–12 стэнов) у курсантов первого года обучения составляют 7 %, высокие значения у первого курса — у 93 % испытуемых.

У четвертого курса 100 % испытуемых имеют высокий уровень развития внимания.

Таким образом, начиная с первого курса внимание у курсантов находится на достаточно высоком уровне развития и повышается к четвертому году обучения.

Личностные качества

Методика «Диагностический опросник «человек — машина» позволяет установить годность тестируемого к трудовой деятельности на транспорте, а в нашем случае — для работы с беспилотными авиационными комплексами. Эта методика дает возможность выявить интерес к технике, степень физического развития и состояния здоровья, определить уровень усидчивости, внимания, чувства самосохранения, реакции, выдержки, ответственности, умения сосредоточиться при существовании ряда внешних раздражителей. Все названные характеристики являются составной частью общей компетентности будущего военного специалиста по работе с беспилотными авиационными комплексами. В рамках исследований в соответствии с этой методикой каждая составляющая в ходе обработки полученных данных оценивается по пятибалльной шкале, где «1» — низкий уровень развития компонента, «5» — уровень профессионализма.

Полученные результаты тестирования по диагностическому опроснику «человек — машина» представлены на рисунке 4.

Важно подчеркнуть, что показатели курсантов первого года обучения по таким базовым характеристикам, как техническая грамотность, устойчивость к внешним раздражителям, внимание, состояние здоровья, физическое развитие и интерес к технике значительно выше, чем у курсантов четвертого года обучения.

Исходя из того, что курсанты первого года обучения адаптируются к новой обстановке и имеют теоретическое и поверхностное представление о предстоящей профессиональной деятельности, мы считаем, что отсутствие именно

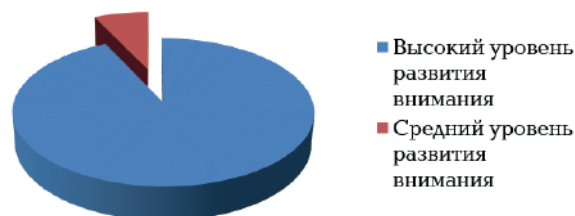


Рисунок 3 — Результаты тестирования курсантов первого курса по методике «Корректирующая проба»

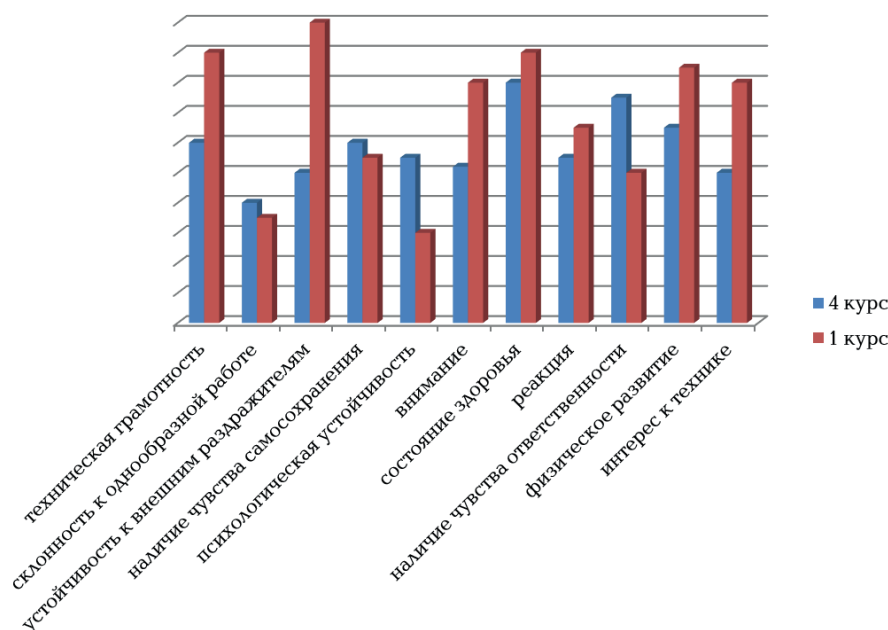


Рисунок 4 — Результаты тестирования курсантов первого и четвертого курса по диагностическому опроснику «человек — машина»

практического опыта и высокая учебная мотивация явились причинами постановки завышенных баллов.

Курсанты четвертого года обучения имеют нужный практический опыт (выполняют самостоятельное управление БЛА в ходе прохождения практики и стажировки в авиационных воинских частях) и дают более разумную оценку развития профессионально важных качеств. Имеющиеся практические знания и навыки обуславливают более высокий уровень развития чувства самосохранения у курсантов государственной авиации 4-го курса (3,52 и 3,67 баллов на 1-м и 4-м курсе соответственно). Объяснением этого факта представляется высокая цена ошибок в работе авиационных специалистов.

Значительная разница баллов психической устойчивости и наличия чувства ответственности среди курсантов не является случайной. Ранее нами было изложено, что курсанты первого года обучения проходят процесс акклиматизации, и это естественным образом рассматривается как предпосылка к возникновению психической напряженности, а чувство ответственности и самостоятельность только начинают формироваться. Успеш-

ное изучение в процессе освоения образовательной программы базовых дисциплин по психологической подготовке к боевым действиям способствует формированию определенного, более высокого уровня психологической устойчивости к экстремальным ситуациям к старшим курсам.

Заключение

Анализ теоретических положений ряда авторов (Г. С. Никифоров, А. К. Маркова, И. Г. Малкина-Пых) свидетельствует о том, что сложный характер военно-авиационной деятельности, воздействие экстремальных факторов сопровождаются снижением у операторов БЛА функциональной надежности, что проявляется в ухудшении работоспособности, возникновении предпосылок к летным происшествиям, снижении эффективности деятельности. Поэтому важными характеристиками, способствующими повышению качества подготовки курсантов, представляются такие показатели, как физическое развитие и техническая грамотность.

В процессе исследования этих качеств испытуемых получены высокие показатели, свидетельствующие

о том, что постоянная физическая подготовка в условиях обучения на военном факультете, стрельбы и спортивные соревнования способствуют развитию уверенности в своих силах и физических возможностях на старших курсах. Курсантами первого года обучения успешно пройден курс молодого бойца, что также является предпосылкой к формированию уверенности в своих физических возможностях. Высокие показатели технической грамотности свидетельствуют об интересе к выбранной специальности и формировании профессионального самосознания.

Важными компонентами структуры профессионально важных качеств для будущего оператора БЛА, получившими нормативные выборы, являются интерес к технике, развитое внимание, устойчивость к внешним раздражителям. Это связано с тем, что военно-профессиональная деятельность осуществляется в особых, неблагоприятных и экстремальных условиях. Приходится нередко выполнять поставленные задачи не в постоянных, а в изменяющихся профессиональных, пространственных, временных, температурных и других условиях. В ряде случаев вероятность аварийной ситуации очень велика, и готов-

ность к ней должна присутствовать постоянно. Этого можно достичь путем обучения, рассматривая разные аварийные ситуации, проигрывая все возможные действия, отработывая нужные психические состояния.

Следует отметить низкий уровень развития таких взаимосвязанных показателей как быстрота принятия решений и склонность к однообразной работе. Профессионально важным качеством является скорость реакции и быстрота принятия решения. Вместе с тем, данные качества имеют психофизиологическую основу и напрямую зависят от темперамента. Такие курсанты тяжело поддаются обучению, к четвертому году обучения еще не полностью сформированы и требуют повышенного внимания со стороны преподавателей авиационных дисциплин. С другой стороны, низкий показатель склонности к однообразной работе говорит о наличии предпосылок к формированию вышеописанного профессионально важного качества. Кроме того, следует отметить, что одним из профессионально важных качеств курсанта военного факультета как военнослужащего и защитника является склонность к однообраз-

ной работе. Для условий боевой деятельности в ряде случаев характерны монотонный труд (боевая разведка), отсутствие режима, сенсорная изоляция, измененная информационная среда, информационный голод, длительное лишение сна, шум, вибрация и др. В этих условиях могут складываться негативные психические качества: неадекватная психическая напряженность, снижение продуктивности деятельности. У других военнослужащих, напротив, мобилизация возможностей.

Таким образом, поведение человека в сложных, часто экстремальных ситуациях, с которыми связана служба военных авиационных специалистов по работе с беспилотными авиационными комплексами, может характеризоваться резким повышением возбуждения (например, импульсивности) или торможения, прекращением, дезорганизацией деятельности. Для своевременного принятия решения в этих ситуациях необходимо развитое оперативное мышление, а также предвосхищение, антиципация.

По результатам проведенного исследования можно сделать вывод, что основные профессионально важные качества формируются

у курсантов к четвертому году обучения, что приходится на этап профессионального роста. Эти выводы совпадают и с мнением самих обучающихся.

Этап профессиональной адаптации курсантов первого курса к условиям обучения на военном факультете и отсутствие практического опыта являются временным препятствием к формированию психологической готовности к профессиональной деятельности.

Это компенсируется наличием высокой учебной мотивации первокурсников и является предпосылкой к формированию психологической готовности к профессиональной деятельности в постадаптационном периоде за счет развития профессионально важных качеств под управлением психологов и преподавателей.

Полученные результаты целесообразно использовать при проведении коррекционных и развивающих мероприятий с курсантами в ходе психологического сопровождения обучения операторов БЛА.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Благинин, А. А. Психофизиологическая характеристика деятельности летного состава / А. А. Благинин, В. С. Новиков // Физиология летного труда : учебник. – СПб. : Наука, 1997. – С. 44–66.
2. Бодров, В. А. Психология профессиональной пригодности: учебное пособие для вузов / В. А. Бодров – М. : ПЕР СЭ, 2001 – 511 с.
3. Благинин, А. А. Надежность профессиональной деятельности операторов сложных эргатических систем / А. А. Благинин. – СПб. : ЛГУ, 2006. – 144 с.
4. Пономаренко, В. А. Деятельность летных экипажей и безопасность полетов / В. А. Пономаренко, В. В. Лапа, А. В. Чунтул. – М., 2003. – 202 с.

REFERENCES

1. Blaginin, A. A. Psychophysiological characteristics of the activity of flight personnel / A. A. Blaginin, V. S. Novikov // Physiology of flight labor: textbook. – St. Petersburg: Nauka, 1997. – P. 44–66.
2. Bodrov, V. A. Psychology of professional fitness. Textbook for universities / V. A. Bodrov – M. PER SE, 2001 – 511 p.
3. Blaginin, A. A. Reliability of professional activity of operators of complex ergatic systems / A. A. Blaginin. – St. Petersburg : LSU, 2006. – 144 p.
4. Ponomarenko, V. A. Activity of flight crews and flight safety / V. A. Ponomarenko, V. V. Lapa, A. V. Chuntul. – M., 2003. – 202 p.

*Статья поступила в редакцию
20.09.2022*

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОДГОТОВКИ АВИАЦИОННЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ В РАМКАХ ПРАКТИКО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Сивицкий Владимир Николаевич – кандидат филологических наук, доцент, заведующий кафедрой социально-гуманитарных дисциплин учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
sivicki69@mail.ru

Тарасюк Всеволод Григорьевич – магистр технических наук, инженер ОАО «Авиакомпания «Белавиа», Республика Беларусь
stavsg.2021@gmail.com

Юхневич Сергей Дмитриевич – инженер по качеству учебно-спортивного учреждения «Минский аэроклуб имени дважды Героя Советского Союза С. И. Грицевца» Республиканского государственного общественного объединения «Добровольное общество содействия авиации, армии и флоту Республики Беларусь», старший преподаватель кафедры социально-гуманитарных дисциплин учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
sergei.museum@mail.ru

Максименко Дарья Андреевна – курсант учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
dasadasa03@mail.ru

Uladzimir Sivicki – Candidate of Philological Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Socio-Humanitarian Disciplines of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
sivicki69@mail.ru

Vsevolod Tarasiuk – Master of Technical Sciences, Engineer of Belavia – Belarusian Airlines, Republic of Belarus
stavsg.2021@gmail.com

Sergey Yukhnevich – Quality Engineer of the educational and sports institution «Minsk Aeroclub named after twice Hero of the Soviet Union S. I. Gritsevets» of the Republican State-Public Association «Voluntary Society for Assistance to Aviation, Army and Navy of the Republic of Belarus», Senior Lecturer of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
sergei.museum@mail.com

Daria Maksimenko – cadet of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
dasadasa03@mail.ru

Аннотация: в статье рассматривается проблематика организации учебного процесса в авиационном учебном заведении. Описывается концепция сотрудничества различных авиационных организаций, имеющая главными целями обеспечить высокий уровень учебного процесса путем повышения заинтересованности курсантов в освоении выбранных специальностей, а также расширить базу знаний и навыков в области применяемых в авиационной отрасли технологий, в том числе инновационных.

Ключевые слова: эффективная подготовка, профессиональное образование, практическая ориентированность, межорганизационное сотрудничество, мотивация, перспективные технологии.

Abstract: the article deals with the problems of organizing the educational process in an aviation educational institution. The concept of cooperation between various aviation organizations is described, with the main goals of ensuring a high level of the educational process and research work of cadets by increasing the interest of students in mastering the chosen specialties, as well as expanding the knowledge base and skills in the field of technologies used in the aviation industry, including innovative ones.

Keywords: effective preparation, professional education, practical orientation, inter-organizational collaboration, motivation, promising technologies.

Введение

Состояние авиации как отрасли является критерием качества авиационного образования. От уровня обученности кадров в значительной степени зависит основная характеристика

авиационно-транспортной системы — безопасность полетов воздушных судов, а также их регулярность, эффективность применения авиации в целом, перспективы ее развития, научно-технический потенциал и совершенство авиационной техники. Профессиональное

образование является важнейшим ресурсом государства в обеспечении экономического роста и реализации инноваций [1 – 4, 6].

По статистическим данным Международной организации гражданской авиации, более 80 % авиационных событий происхо-

дит по вине работников, обеспечивающих выполнение полетов воздушных судов [4, с. 1].

Значимость роли человеческого фактора в обеспечении безопасности и эффективности функционирования авиационно-транспортной системы обуславливает высокие требования к профессиональным и личностным качествам авиационных специалистов.

Проблема качества профессионального образования имеет два главных аспекта: профессиональная надежность и соответствие сформированных компетенций специалистов требованиям заказчиков кадров — предприятий отрасли [5, 6, 8, 9].

Профессиональная надежность — объем знаний, умений и качество навыков — определяется не только объемом учебной программы, но во многом и личностными характеристиками специалистов: уровнем поисковой активности, эвристическими качествами [5, с. 3].

Проблема взаимосвязи обучения и практических требований к специалистам является ключевой в обеспечении успешной профессиональной адаптации и эффективного выполнения трудовых функций. На предприятиях отрасли четко определяется диспропорция между возможностями теории и практики учебного процесса и методами осуществления этого процесса в учебных заведениях. Это условие диктует необходимость постоянного совершенствования взаимодействия учреждений образования и отраслевых организаций [6, 8, 9].

Одним из путей и механизмов наиболее полной интеграции науки, образования и производства: создании на базе учебных заведений и отраслевых предприятий научно-производственно-образовательных кластеров [7, с. 8].

Среди направлений осуществления интеграционных процессов в профессиональной деятельности и в профессиональном образовании в теории и на практике можно выделить:

- интеграцию профессиональной школы и производства для формирования количественного и качественного заказа на подготовку кадров;

- интеграцию науки и образовательного процесса для обеспечения

так называемого опережающего профессионального образования;

- интеграцию образовательных структур, реализующих образовательные программы различного уровня для создания единой образовательной базы [7, с. 8, 9].

Развитие и широкое распространение на практике результатов таких интеграционных процессов позволяет эффективно использовать материально-техническую базу, кадровый потенциал учебных заведений и затрачиваемые на учебный процесс средства, создает качественно новые условия для совершенствования системы подготовки квалифицированных кадров. Вместе с тем, повышается привлекательность учреждений профессионального образования для молодежи [7, с. 9].

В интеграции учебной, научной и производственной познавательной деятельности обучающихся состоит *сущность практико-ориентированного профессионального образования* [10, с. 3].

Целью практико-ориентированного образования является активизация и углубление процесса поиска и получения новых знаний, умений и навыков; формирование у будущих специалистов практического опыта (в постановке целей, оценки явлений и процессов, решении профессиональных задач, в том числе нестандартных), потребности в дальнейшей профессиональной самореализации [10, с. 8].

Главной задачей практико-ориентированного образования является повышение качества подготовки специалистов по техническим специальностям, т. е. удовлетворение потребностей современного рынка труда в практически подготовленных специалистах, имеющих не только глубокие знания, но и, главным образом, профессиональные компетенции и опыт их применения. Это требование обуславливает необходимость перехода в профессиональном образовании от знаниевой парадигмы к практико-ориентированной, основанной на квинтете «знания — умения — навыки — опыт деятельности — компетентность» [13, с. 29].

Суть практико-ориентированного образования должна состоять не только в увеличении практического компонента образовательного процесса, но и в единстве тео-

ретического и практического обучения, а также приведении содержания учебных программ в соответствие с актуальными технологиями и производственными процессами [7, с. 8].

Формой реализации практико-ориентированного образования является производительный труд обучающихся, то есть практическая отработка осваиваемой ими профессиональной деятельности.

Только при использовании производительного труда представляется возможным широкое внедрение практико-ориентированного обучения в среду профессионального образования [10, с. 3].

Система дидактических принципов, определяющих практико-ориентированное обучение, включает следующие принципы:

- доступности;
- наглядности;
- эмоциональности;
- сознательности и активности;
- систематичности и последовательности;
- связи теории с практикой [14];
- научности;
- прочности [14].

Интенсивное развитие авиационной отрасли в последние десятилетия определяет актуальность проблемы повышения качества обучения авиационных специалистов в Республике Беларусь, а сформированная за этот период дидактическая система предопределяет практическую ориентированность профессионального обучения как наиболее перспективное решение этой проблемы.

Задача подготовки авиационных специалистов на требуемом уровне лежит на специализированных учебных заведениях. К ним относятся, в частности, учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации» (БГАА), а также учебно-спортивные учреждения — аэроклубы республиканского государственно-общественного объединения «Добровольное общество содействия авиации, армии и флоту Республики Беларусь» (ДОСААФ).

Одним из направлений повышения качества подготовки авиационных специалистов представляется осуществление практико-ориентированного обучения на основе совместной работы

учреждений образования и учебно-спортивных учреждений. Авторами сформулирована концепция практико-ориентированного обучения курсантов авиационно-технических специальностей в рамках взаимодействия БГАА и Минского аэроклуба ДОСААФ. Описание концепции приведено в основной части.

Концепция практико-ориентированного обучения курсантов авиационно-технических специальностей

Методической основой описываемой концепции является соблюдение основных требований к современным педагогическим технологиям:

- стимулирование у обучающихся устойчивой мотивации к учебной деятельности;
- диалогичность обучения (в сотрудничестве с обучающимися);
- диагностичность обучения (постоянное наблюдение и корректировка деятельности обучающихся);
- вариативность обучения для разных категорий обучаемых;
- соответствие темпа и средств обучения сложности задач и индивидуальным особенностям обучающихся;
- помощь обучающимся на уровне их фактических способностей;
- развитие способности к рефлексии;
- обеспечение набора заданий для каждой группы обучающихся с целью развития самостоятельности и предупреждения ригидности каждого из них;
- стимулирование инициативы и творчества обучающихся;
- содействие формированию субъектности каждого обучающегося, развитию его самостоятельности и ответственности относительно познавательной деятельности;
- обеспечение условий для формирования социально-интегрированной личности каждого обучающегося [11, с. 4, 5].

Основным требованием к разрабатываемой концепции практико-ориентированной подготовки авиационных специалистов является соблюдение всех основных дидактических целей практики, направленных на обеспечение

интеграции теоретической и практической подготовки специалистов:

- закрепление, обобщение и систематизация знаний путем их применения в реальной деятельности;
- формирование профессиональных умений и навыков;
- подготовка обучающихся к самостоятельной профессиональной деятельности по избранной специальности [12, с. 20].

Для формирования практико-ориентированных умений в процессе профессиональной подготовки обучающихся необходима проработка всех структурно-составных компонентов этих умений: мотивов действий обучающихся, теоретических знаний и действий, нацеленных на решение профессиональных задач, а также реализация следующих организационно-педагогических условий:

- активизация деятельности обучающихся по освоению действий, нацеленных на успешное решение профессиональных задач;
- обогащение знаний, умений в соответствии с требованиями профессиональных стандартов посредством решения ситуационных задач на специализированной материально-технической базе;
- приобщение обучающихся к производственно-технологической деятельности при прохождении практик в организациях отрасли [9, с. 4, 9, 10].

В вопросе эффективной подготовки специалистов первоочередным аспектом является проблема формирования заинтересованности обучающихся в получаемой специальности, что особенно важно на начальном этапе обучения. Практика показывает, что большинство абитуриентов и учащихся первого курса не имеют четкого представления об авиационной отрасли, ее истории. Однако для многих из них новая область — авиация — представляет интерес. Иногда имеет место потеря обучающимися энтузиазма (в отдельных случаях — вплоть до полного нежелания) в освоении выбранной профессии. Для повышения мотивации обучающихся, расширения их базы профессиональных знаний и навыков необходимо практическое ознакомление обучающихся с основами выбранных специальностей и, в целом, практическая ориентированность профессиональной подго-

товки. Кроме того, целесообразно внедрить в программу подготовки практическое изучение перспективных технологий.

Принимая во внимание это обстоятельство, в качестве основы концепции практико-ориентированного обучения авторами было выбрано практическое изучение курсантами БГАА основ профильных специальностей и истории авиации на базе музейного сектора Минского аэроклуба ДОСААФ, в рамках которого предусматривается освоение следующих форм дополнительной профессиональной подготовки:

- исследовательская работа при решении прикладных задач, а также в области истории авиации;
- реставрация и ремонт авиационной техники (АТ);
- техническое обслуживание АТ;
- демонтажно-монтажные работы на АТ;
- изучение основ аддитивных технологий и исследований материалов, и их применение для реставрации АТ;
- экскурсионная работа.

Способствовать реализации такой деятельности будет курсантское научное общество БГАА, в частности, курсантский научный кружок «Социально-гуманитарные проблемы в авиации» и научно-исследовательское направление «Экспериментальные исследования деталей с помощью аддитивной технологии и установление зависимостей механических свойств изделий от режимов» (позволяющее осуществлять такие перспективные для авиационной отрасли формы деятельности, как работа с основами аддитивных технологий: 3D-моделирование, 3D-сканирование, 3D-печать, а также исследование механических характеристик материалов и проведение металлографических исследований).

Рассмотрим несколько примеров практических задач для курсантов.

Пример № 1: изготовление макетов оборудования, представляющего повышенную опасность для человека.

Состав авиационного оборудования (АО) многих экспонатов музейного сектора Минского аэроклуба ДОСААФ предусматривает наличие радиоизотопных индикаторов облучения РИО-3 (рисунок 1). Ввиду повышенного радиоактивного излучения, эти приборы не должны быть установлены на экспонатах

музея. Для сохранения технической аутентичности экспонатов предлагается 3D-моделирование и изготовление (3D-печать) макетов РИО-3 из АБС-пластика (рисунок 2).

Для выполнения работы курсантам необходимо:

1) изучить конструкцию и состав АО экспонатов АТ;

2) изучить техническую литературу по конкретному оборудованию (РИО-3);

3) произвести 3D-моделирование изделия; изготовить макеты изделия методом 3D-печати;

4) исследовать механические свойства изготовленных макетов (в данном случае, для определения значения момента затяжки крепежных элементов при монтаже макетов на летательные аппараты (ЛА));

5) произвести монтаж макетов изделий на экспонаты ЛА.

При проведении этих операций прорабатываются важные направления образовательного процесса:

- детальное ознакомление курсантов БГАА с конструкцией и оборудованием различных летательных аппаратов, при этом курсанты приобретают знания по специальности «Техническая эксплуатация воздушных судов и двигателей»;

- работа с технической литературой;

- освоение основ аддитивных технологий 3D-моделирования и 3D-печати;

- проведение экспериментально-исследовательской работы в области материаловедения и механики материалов;

- монтажно-демонтажная практика на АТ, работа с инструментом.

Пример № 2: реставрация элементов планера ЛА.

На экспонате учебно-тренировочного самолета Як-18 музейного сектора Минского аэроклуба ДОСААФ отсутствуют элероны. Изготовление оригинальных элеронов возможно только в заводских условиях.

Специалистами музейного сектора предлагается следующая стратегия реставрации:

1) определение геометрических размеров и типа профиля крыла и элеронов самолета Як-18 по технической документации на данный тип ЛА;

2) определение типа и геометрических размеров лонжеронов элеронов;

3) создание чертежей (или 3D-моделей) лонжеронов элеронов;

4) изготовление из металла (или 3D-печатью АБС-пластиком) лонжеронов элеронов;

5) определение геометрических размеров (аэродинамической хорды) нервюр элеронов с помощью силовой схемы самолета;

6) определение геометрических размеров профиля (с помощью справочника аэродинамических профилей) для каждой нервюры элеронов;

7) создание 3D-моделей нервюр элеронов (с учетом имеющихся чертежей или 3D-моделей лонжеронов, на которые будут крепиться нервюры, и предварительно разработанного метода крепления) (рисунок 3);

8) изготовление нервюр элеронов из АБС-пластика методом 3D-печати;

9) сборка силового набора элеронов;

10) обшивка элеронов;

11) монтаж элеронов на экспонат самолета (рисунок 4).

В контексте вышеперечисленных примеров также является актуальным изготовление с помощью аддитивных технологий различных комплектующих изделий АТ небольших размеров, например, электростатических разрядников (рисунок 5), часто отсутствующих на экспонатах АТ.

Выполнение такой работы будет способствовать приобретению курсантами БГАА умений и навыков в области проектирования, конструирования, изготовления и ремонта АТ. Кроме того, посредством ознакомления со специальной литературой и с различной АТ курсанты будут вовлечены в изучение истории авиации как в техническом плане, так и в социально-гуманитарном: метаморфозы авиационных конструкций, практическое применение различных технических решений, а также в более широком смысле — исторические аспекты развития авиации.

Полученные знания и навыки благотворно скажутся на развитии курсантов как будущих авиационных специалистов различных направлений деятельности, повысят уровень общей эрудиции и технической грамотности.

В целях усиления практикоориентированности обучения возможно также рассматривать вопрос о создании филиала кафедры социально-гуманитарных дисциплин БГАА в линейной организации.



Рисунок 1 — Радиоизотопный индикатор обледенения РИО-3 и свинцовый чехол для его чувствительного элемента

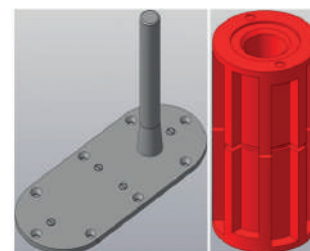


Рисунок 2 — 3D-модели радиоизотопного индикатора обледенения РИО-3 и свинцового чехла для его чувствительного элемента



Рисунок 3 — 3D-модели нервюр фрагмента отъемной части крыла самолета Як-18 в месте расположения элерона («заготовки» 3D для моделей нервюр элерона)

Описанная концепция ставит перед собой следующие цели:

1) повышение мотивации курсантов в обучении, развитие интереса к осваиваемым специальностям и к авиации в целом;

2) поднятие теоретической и практической подготовки курсантов, а также научно-исследовательской работы курсантов на качественно новый уровень.

Целесообразным также представляется участие курсантов, экскурсионной работе — для развития коммуникативных и, в перспективе, педагогических навыков.



Рисунок 4 — Курсант и член КНО БГАА производит монтаж элерона на левое полукрыло самолета Як-52 — экспоната МАТ МАК ДОСААФ

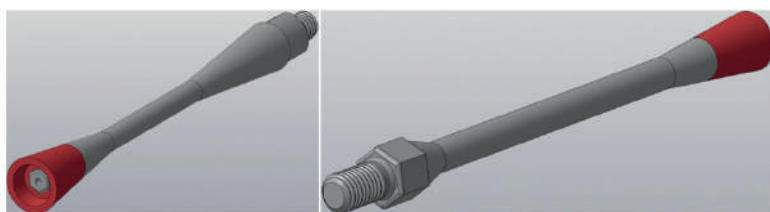


Рисунок 5 — 3D-модели различных электростатических разрядников

Заклучение

В 2015 году Республика Беларусь была принята в Болонский процесс, в рамках которого на данный момент происходит так называемая «технологизация высшего образования». Сущность данного подхода заключается в том, что учебный процесс выстраивается таким образом, что целью и результатом образовательных программ является не получение профильных знаний, умений и навыков, а овладение технологией производства знания в той отрасли, которую будущий специалист видит в качестве объекта приложения своих усилий [8, с. 137].

На практике, применение технологического подхода в профессиональном образовании сопровождается негативным эффектом, выраженным в низкой профессиональной подготовленности молодых специалистов.

Это обусловливается, главным образом, недостаточным обеспечением и низкой эффективностью организации использования материально-технических баз профессиональной подготовки в учебных заведениях, а также, как следствие, низкой мотивацией обучающихся в овладении профессиональными знаниями и навыками и освоении выбранных профессий.

Видимым недостатком реализации технологического подхода является отсутствие у обучающихся

необходимых первоначальных умений и навыков по выполнению основных профессиональных действий. Подготовке обучающихся к практической деятельности в рамках учебного процесса уделяется недостаточное внимание, что неизбежно ведет к невозможности полноценной реализации потенциала практик [12, с. 20].

Согласно изложенной в работе концепции, обучение курсантов будет происходить одновременно с учетом традиционных основ профессионального образования и инновационной тенденции обучения их технологии получения знаний (исследовательского обучения). При этом обеспечится подход обучающихся к познавательной самостоятельности путем организации учебного процесса на основе специальной «затравки» — предварительной подготовки в виде развития мотивации к учебе и обучения основным профессиональным знаниям и навыкам. Это обеспечит эффективное формирование практического опыта обучающихся при погружении их в профессиональную среду, что является главной целью практико-ориентированного подхода в обучении.

Такой подход будет способствовать профессиональному самоопределению обучающихся в авиационной сфере и, следовательно, успешному освоению ими основ выбранных специальностей с вы-

соким интересом и хорошим качеством. При оценке соответствия описанной концепции дидактическим принципам практико-ориентированного обучения, можно констатировать, что она:

- позволяет активно использовать для обучения широкую номенклатуру технических изделий, средств их обслуживания и специализированную техническую литературу (соблюдается принцип доступности);

- реализует интерактивную форму изучения материала при закреплении обучающимися полученных знаний во время работы с техникой (соблюдается принцип наглядности);

- формирует у обучающихся положительное отношение к созидательному труду, мотивирует их к получению новых знаний и выработке навыков, развивает чувство ответственности за уровень качества своей работы и объекты своего труда (соблюдается принцип эмоциональности);

- способствует формированию у обучающихся интереса к выбранной профессии и высокой их мотивированности в ее успешном освоении (соблюдается принцип сознательности и активности);

- обеспечивает освоение обучающимися сложной техники по принципам перехода «от теории к практике» и «от простого к сложному» (соблюдается принцип систематичности и последовательности);

- обеспечивает использование обучающимися полученных знаний при работе с техникой (соблюдается принцип связи теории с практикой);

- способствует развитию научно-исследовательской деятельности обучающихся при освоении ими инновационных технологий и решении нестандартных задач (соблюдается принцип научности);

- позволяет обучающимся эффективно закреплять полученные знания путем их применения в процессе практической деятельности (соблюдается принцип прочности).

Предлагаемая авторами концепция позволит реализовать научно-познавательный потенциал обучающихся в интерактивной форме. Высокая эффективность практико-ориентированного профессионального образования будет обусловлена соблюдением всех соответствующих дидактических принципов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Левицкий, М. И. Итоги работы межведомственной рабочей группы по созданию единого авиационного вуза в Республике Беларусь / М. И. Левицкий, Ю. А. Какошко // Единая образовательная система подготовки авиационных специалистов в Республике Беларусь: сборник материалов межведомственной научно-практической конференции, г. Минск, 16–17 декабря 2004 г. / Государственный комитет по авиации Республики Беларусь; ред. кол.: Ю. П. Бугренко [и др.]. – Минск, 2005. – С. 3–9.
2. Какошко, Ю. А. Система подготовки специалистов государственной авиации Республики Беларусь: подходы и их обоснование / Ю. А. Какошко // Единая образовательная система подготовки авиационных специалистов в Республике Беларусь: сборник материалов межведомственной научно-практической конференции, г. Минск, 16–17 декабря 2004 г. / Государственный комитет по авиации Республики Беларусь; редкол.: Ю. П. Бугренко [и др.]. – Минск, 2005. – С. 15–20.
3. Науменко, А. И. Развитие системы подготовки авиационных специалистов в трансформационный период Республики Беларусь / А. И. Науменко. – Минск, 2002. – 20 с.
4. Сидорович, Н. А. Организационно-педагогические основы профессиональной подготовки авиационных специалистов / Н. А. Сидорович // Белорусский государственный педагогический университет имени М. Танка. – Минск, 1998. – 19 с.
5. Глухих, И. Н. Методы, алгоритмы обработки и управления в экспертных системах проблемного обучения авиационных специалистов / И. Н. Глухих // Киевский международный университет гражданской авиации. – Киев, 1994. – 16 с.
6. Старовойтова, И. А. Система профессионального образования Республики Беларусь: современное состояние и направления развития / И. А. Старовойтова // Профессиональное образование. – 2020. – № 3 (41). – С. 3–7.
7. Калицкий, Э. М. Интеграционные процессы в развитии профессионального образования / Э. М. Калицкий, М. В. Ильин // Профессиональное образование. – 2018. – № 1 (31). – С. 7–11.
8. Янецкий, А. В. Формирование аналитических навыков у студентов в условиях технологического подхода к образовательным стандартам / А. В. Янецкий // Потребительская кооперация: история, традиции, современность: Материалы международной научно-практической конференции, Гомель, 26–27 мая 2011 / Белорусский торгово-экономический университет потребительской кооперации – Гомель: БТЭУ ПК, 2011. – С. 136–137.
9. Трояк, А. Ю. Формирование практикоориентированных умений в процессе профессиональной подготовки курсантов вузов МЧС России: автореф. дис. канд. пед. наук: 13.00.08 / А. Ю. Трояк; Красноярский гос. пед. ун-т. – Красноярск, 2020. – 24 с.
10. Рябова, М. А. Производственный труд как средство практико-ориентированного обучения студентов колледжа: автореф. дис. канд. пед. наук: 13.00.08 / М. А. Рябова; Орлов. гос. ун-т. – Орел, 2017. – 25 с.
11. Подольская, Е. А. Особенности педагогических технологий в контексте модернизации высшей школы Украины / Е. А. Подольская, В. Н. Назаркина // Инновационные образовательные технологии. – 2015. – № 3. – С. 3–8.
12. Борисова, Л. Г. Совершенствование профессионально-практической подготовки курсантов учреждений высшего образования МЧС / Л. Г. Борисова // Инновационные образовательные технологии. – 2015. – № 3. – С. 19–24.
13. Терехов, А. А. Развитие мышления курсантов посредством использования психологического интерактивного полигона / А. А. Терехов // Инновационные образовательные технологии. – 2015. – № 3. – С. 29–34.
14. Система дидактических принципов обучения – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://studopedia.su/1_21977_lektsiya.html – Дата доступа: 29.03.2022.

REFERENCES

1. Levitskiy, M. I. The results of the work of the interdepartmental working group on the creation of a unified aviation university in the Republic of Belarus / M. I. Levitskiy, Yu. A. Kakoshko // Collection of materials of the interdepartmental scientific and practical conference "Unified educational system for training aviation specialists in the Republic of Belarus". – Minsk, 2005. – P. 3–9. Buldyk, H. M. Formation of an engineer's professional culture / G. M. Buldyk // Pedagogical science and education. – 2021. – № 4. – P. 76–83.
2. Kakoshko, Yu. A. The system of training of state aviation specialists of the Republic of Belarus: approaches and their rationale / Yu. A. Kakoshko // Collection of materials of the interdepartmental scientific and practical conference "Unified educational system for training aviation specialists in the Republic of Belarus". – Minsk, 2005. – P. 15–20.
3. Naumenko, A. I. Development of the system of training aviation specialists in the transformational period of the Republic of Belarus / A. I. Naumenko. – Minsk, 2002. – 20 p.
4. Sidorovich, N. A. Organizational and pedagogical foundations of professional training of aviation specialists / N. A. Sidorovich. – Minsk: Belarusian State Pedagogical University named after M. Tank, 1998. – 19 p.
5. Glukhikh, I. N. Methods, algorithms for processing and control in expert systems of problem-based training of aviation specialists / I. N. Glukhikh. – Kyiv: Kyiv International University of Civil Aviation, 1994. – 16 p.
6. Starovoitova, I. A. The system of vocational education of the Republic of Belarus: current state and directions of development / I. A. Starovoitova // Professional education. – 2020. – No. 3 (41). – P. 3–7.
7. Kalitsky, E. M. Integration processes in the development of vocational education / E. M. Kalitsky // Professional education. – 2018. – No. 1 (31). – P. 7–11. Shageeva, F. T. Modern educational technologies (experience of an engineering university) / F. T. Shageeva, V. G. Ivanov // Higher education in Russia. – 2006. – No. 4, p. 129–132.
8. Yanetsky, A. V. Formation of analytical skills in students in the context of a technological approach to educational standards / A. V. Yanetsky // Materials of the international scientific-practical conference "Consumer cooperation: history, traditions, modernity". – Gomel, 2011. – P. 136–137.
9. Troyak, A. Yu. Formation of practice-oriented skills in the process of professional training of cadets of universities of the Ministry of Emergency Situations of Russia. Abstract of thesis PhD (Pedagogy) / A. Yu. Troyak. – Krasnoyarsk, 2020. – 24 p.
10. Ryabova, M. A. Industrial labor as a means of practice-oriented training of college students. Abstract of thesis PhD (Pedagogy) / M. A. Ryabova. – Orel, 2017. – 25 p.
11. Podolskaya, E. A. Peculiarities of pedagogical technologies in context of modernization of higher education in Ukraine / E. A. Podolskaya, V. N. Nazarkina // Innovative educational technologies. – 2015. – No. 3. – P. 3–8.
12. Borisova, L. G. Improving the professional and practical training of cadets of higher education institutions of the Ministry of Emergency Situations / L. G. Borisova // Innovative educational technologies. – 2015. – No. 3. – P. 19–24.
13. Terekhov, A. A. Development of cadets' thinking through the use of a psychological interactive training ground / A. A. Terekhov // Innovative educational technologies. – 2015. – No. 3. – P. 29–34.
14. The system of didactic principles of teaching [Electronic resource]. – Access mode: https://studopedia.su/1_21977_lektsiya.html – Access date: 29.03.2022.

*Статья поступила в редакцию
15.11.2022*

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОТОВНОСТИ К БУДУЩЕЙ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ КУРСАНТОВ С РАЗНЫМ ТИПОМ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ МОТИВАЦИИ

Машарский Захар Владимирович – кандидат психологических наук, декан факультета гражданской авиации учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
aviabsaanir@gmail.com

Zakhar Masharsky – Candidate of Psychological Sciences, Dean of the Faculty of Civil Aviation of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
aviabsaanir@gmail.com

Козлова Ольга Григорьевна – магистр психологии, педагог-психолог 1 категории отдела воспитательной работы с молодежью учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь

Olga Kozlova – Master of Psychology, teacher-psychologist of the 1st category of the Department of upbringing work with young people of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus

Аннотация: в статье представлены исследования готовности к профессиональной деятельности курсантов старших курсов учреждения высшего образования с разными типами мотивации. Обоснована важность мотивационной составляющей как для освоения основ будущей профессии, так и для психологической готовности к профессиональной деятельности. Показано, что значительной массе студентов требуется коррекционно-развивающая помощь для повышения уровня их готовности к профессиональной деятельности как специалистов.
Ключевые слова: готовность к профессиональной деятельности, внешняя и внутренняя мотивация, профессиональная мотивация, мотивы выбора профессии, коррекционно-развивающая программа.

Abstract: the article presents studies of readiness for professional activity of senior students of higher education institutions with different types of motivation. The importance of the motivational component is substantiated both for mastering the basics of the future profession and for psychological readiness for professional activity. It is shown that a significant mass of students require correctional and developmental assistance to increase their level of readiness for professional activity as specialists.
Keywords: readiness for professional activity, external and internal motivation, professional motivation, motives for choosing a profession, correctional and developmental program.

Введение

Процесс совершенствования подготовки будущих специалистов в условиях современного образования достаточно сложен и обусловлен многими факторами, одним из которых является мотивация профессиональной деятельности, т. е. конкретные побуждения, обуславливающие выбор профессии и продолжительное выполнение, связанных с ней обязанностей [1]. Профессиональная мотивация динамична, изменчива и представляет собой непрерывный процесс, протекающий под постоянным воздействием объективных и субъективных факторов [2].

В связи с выбором той или иной профессии важно учитывать и склонность человека, которая в концепции индивидуально-психологических различий Б. М. Теплова определяется как направленность на занятие той или иной деятельностью, основанной на личном отношении [3].

Сегодня вопрос о мотивации личности, занимает одну из лидирующих позиций в психологии. Мотивация — это не только внутренняя психологическая необходимость в определенном действии, мобилизованность и готовность личности, но и отношение к самому процессу реализации действий и способов достижения результатов [1].

В настоящее время мотивация, как психическое явление, рассматривается различными авторами по-разному:

- 1) как совокупность факторов, поддерживающих и направляющих, т. е. определяющих поведение (К. Мадсен) [4];
- 2) как совокупность мотивов (К. К. Платонов);
- 3) как побуждение, вызывающее активность организма и определяющее ее направленность (М. Ш. Магомед-Эминов);
- 4) как процесс психической регуляции конкретной деятельности (М. Ш. Магомед-Эминов).

Определения мотивации делятся на два направления. Первое рассматривает мотивацию со структурных позиций, как совокупность факторов или мотивов. В этом случае, по мнению Д. В. Шадрикова, «мотивация обусловлена потребностями и целями личности, уровнем притязаний и идеалами, условиями деятельности» [4].

Второе направление рассматривает мотивацию как динамичное образование, как процесс, механизм. При этом мотивация выступает как вторичное явление по отношению к мотиву [1]. В. А. Иванников считает, что процесс мотивации начинается с актуализации мотива. По мнению А. Н. Леонтьева: мотив — предмет удовлетворения потребностей, т. е. мотив дан человеку уже готовым.

Наиболее часто встречающейся является классификация мотивов, предложенная А. Н. Леонтьевым [2]:

- реально действующие мотивы;
- потенциальные мотивы;
- смыслообразующие мотивы.

По А. Н. Леонтьеву мотивация употребляется в двух значениях. Первое — узкое, оно включает совокупность побуждений, направляющих какую-либо конкретную деятельность. Второе — широкое, которое под понятием мотивации объединяет в себе все устойчивые мотивы человека, определяющие его совокупную деятельность.

В каждой школе вопрос мотивации рассматривается со своей точки зрения. Основным механизмом формирования мотивации, согласно бихевиоризму, является стремление организма снять напряжение, вызванное возникшей потребностью. Иными словами, работает принцип гомеостаза: при отклонении от нормы система стремится вернуться в исходное состояние. Но способ поведения не связан однозначно с потребностью, он зависит и от подкрепления, т. е. от того, что способно удовлетворить эту потребность. Поведение инициируется потребностью, а формируется под влиянием среды, структуры подкреплений. Согласно гуманистической теории, ведущим постулатом является самоценность каждого индивида, способного самостоятельно определять свой жизненный путь. Основой мотивирующей силы человеческого поведения является реализация индивидом своих способностей. При этом отрицается возможность аналитического, рационального познания человеческой сущности.

В связи с требованиями обеспечения конкурентоспособности специалистов на рынке труда особую актуальность приобретает проблема профессиональной готовности курсантов к будущей профессиональной деятельности. Современный этап развития общества предъявляет к работе профессионалов новые требования. Молодому специалисту после окончания высшего учебного заведения требуется, как правило, еще немало времени, чтобы адаптироваться к условиям профессиональной деятельности. Несмотря на то, что такая адаптация на конкретных местах происходит на базе основного багажа знаний и умений, приобретаемых в учебном заведении, одну из главных ролей играет наличие у молодого специалиста готовности к профессиональной деятельности.

Молодые специалисты должны иметь разностороннюю профессиональную подготовку, навыки

практической работы, сочетаемые с качествами активного гражданина, способного быстро перестраиваться в условиях научно-технического и социального прогресса и находить наиболее целесообразные решения стоящих перед ним задач, что будет свидетельствовать о высокой профессиональной готовности и о формировании профессиональной культуры.

Как профессионально важное качество личности готовность курсанта является сложным психологическим образованием и включает в себя:

- а) положительное отношение к профессии;
- б) черты характера, адекватные требованиям профессиональной деятельности, способностям, проявлениям темперамента;
- в) необходимые знания, навыки, умения;
- г) устойчивые профессионально важные особенности восприятия, памяти, внимания, мышления, эмоциональных, волевых процессов и т. д. [4].

Готовность может выступать и в виде психического состояния, которое, хотя и не является качеством личности, все же может характеризовать возможность курсанта решать в условиях обучения задачи, близкие к реальным задачам профессиональной деятельности, а после успешно применять полученный опыт на рабочем месте. Психическое состояние готовности — это «настрой», актуализация и приспособление возможностей личности для успешных действий в данный момент. Таким образом, готовность как психическое состояние личности курсанта — это его внутренняя настроенность на определенное поведение при выполнении учебных и трудовых задач, установка на активные и целесообразные действия (во время и после окончания обучения) [6].

Будущая профессиональная деятельность молодых специалистов в авиации является деятельностью в особых условиях, заключающихся в повышенной ответственности за жизнь людей и сохранение техники [7].

Подчеркивая важность личностного подхода к изучению состояния готовности, П. А. Рудик [8] рассматривает готовность как сложное психологическое образование и выделяет в ней роль познавательных психических процессов, отражающих важнейшие стороны выполняемой деятельности, эмоциональных компонентов, которые могут как усиливать, так и ослаблять активность человека, его волевых компонентов, способствующих совершению эффективных действий по достижению цели, а также мотивов поведения.

А. В. Кондрашова [7] считает, что готовность к деятельности предполагает образование таких необходимых отношений, установок, свойств и качеств личности, которые обеспечивают будущему специалисту возможность сознательно и добросовестно, со знанием дела приступить и творчески выполнить свои профессиональные функции и обязанности.

По мнению М. И. Дьяченко и Л. А. Кандыбовича [9], готовность — это настрой личности на определенное поведение, установка на активные действия, приспособление личности для успешных действий в данный момент, обусловленные мотивами и психическими особенностями личности. Ими выделяются следующие виды готовности: заблаговременная,

общая (или длительная) и временная (ситуативная). Первая представляет собой ранее приобретенные установки, знания, навыки, умения, мотивы деятельности. На ее основе возникает состояние готовности к выполнению тех или иных текущих задач деятельности. Временное состояние готовности — это актуализация, приспособление всех сил, создание психологических возможностей для успешных действий в данный момент. Ситуативная готовность — это динамичное целостное состояние личности, внутренняя настроенность на определенное поведение, мобилизованность всех сил на активные и целесообразные действия.

Авторы подробно рассматривают пути создания общей и ситуативной готовности. Готовность человека к успешным действиям в аварийной ситуации складывается из его личностных особенностей, уровня подготовленности, полноты информации о случившемся, наличия времени и средств, для ликвидации аварийной ситуации, наличия информации об эффективности предпринимаемых мер. Анализ поведения человека в аварийной ситуации показывает, что наиболее сильным раздражителем, приводящим к ошибочным действиям, является именно неполнота информации. Нужна предварительная и достаточно высокая психологическая готовность, которая позволила бы компенсировать недостаток информации. Для этого необходимы тренировки, развивающие быстроту мышления, подсказывающие, как использовать прежний опыт для успешных действий в условиях неполной информации, формирующие способность переключения с одной установки на другую и способность к прогнозированию и предвосхищению. В ходе таких тренировок необходимо увеличить объем и распределяемость внимания и подготовить человека к тому, чтобы в аварийной ситуации он воспринимал не все элементы производственной ситуации, а только необходимые.

Приемы формирования психологической готовности, как считают М. И. Дьяченко и Л. А. Кандыбович, имеют много общего с приемами волевой подготовки. Создание состояния готовности к труду прямо зависит от уровня развития волевых свойств и способности к управлению ими. Обобщение методов и приемов создания и поддержания психологической готовности и их уточнение применительно к конкретной деятельности представляют собой пока еще слабо используемый резерв повышения надежности трудовой деятельности в экстремальных условиях.

Многие исследователи отождествляют понятие «готовность» с понятием «установка». Как известно, проблема установки была специальным предметом в школе Д. Н. Узнадзе. По Д. Н. Узнадзе, «установка является целостным динамическим состоянием субъекта, состоянием готовности к определенной активности, состоянием, которое обуславливается двумя факторами: потребностью субъекта и соответствующей объективной ситуацией» [10]. Предложенное им понимание установки не связано с анализом социально-психологических факторов, детерминирующих поведение личности с усвоением индивидуальным социальным опытом. Установка в контексте концепции Д. Н. Узнадзе более всего касается вопроса

о реализации простейших физиологических потребностей человека. По нашему мнению, понимание Д. Н. Узнадзе установки как бессознательного исключает применение этого понятия к изучению наиболее сложных, высших форм человеческой деятельности. Д. Н. Узнадзе понимал установку как более широкое явление, чем готовность. Готовность определялась им как существенный признак установки. С другой стороны, М. И. Дьяченко и Л. А. Кандыбович разводят эти два понятия с точки зрения конкретно-психологической природы феноменов, которые данные дефиниции обозначают. Установка, с их точки зрения, является лишь формой готовности [10].

А. К. Маркова определяет, что профессионализация, включающая в себя, в том числе и психологическую готовность, как многоканальный процесс, идет сразу по нескольким направлениям. У нее через обучение и воспитание формируется мотивационная и операциональная сферы. Психологическую готовность к профессиональной деятельности в таком случае характеризует динамика изменений в мотивационной сфере личности, формирование в ней профессионально значимых установок, изменение ценностно-смысловой структуры мировосприятия личности [11].

В. В. Соглаев отмечает, что в структуру психологической готовности входят мотивационный, ориентационный, эмоционально-волевой, личностно-операциональный и оценочно-рефлексивный компоненты [12].

Одним из важнейших компонентов и ключевым условием, которое определяет успешность и эффективность профессиональной деятельности является мотивация [13]. Мотивы, как считает К. М. Дурай-Новикова, выступают как системообразующие элементы готовности к деятельности [14]. По мнению Р. Д. Санжаевой «вне мотива и смысла невозможны ни одна деятельность, нереализуемы никакие, даже самые усвоенные знания и предельно сформированные умения» [15]. В структуре готовности мотивационный компонент выделяют такие исследователи как Л. В. Антропова, Д. В. Воробьева, К. М. Дурай-Новикова, М. И. Дьяченко, В. А. Жарова, Л. А. Кандыбович, Г. А. Кручинина Р. Д. Санжаева, Ю. В. Шумиловская и др.

Таким образом, можно заключить, что одной из важнейших проблем современных психологических исследований является проблема готовности к будущей профессиональной деятельности. Анализ ее структур включает соотношение разнообразных компонентов, содержательной и динамической сторон, которые в свою очередь влияют на формирование мотивации профессиональной деятельности.

Готовность к будущей профессиональной деятельности курсанта можно определить как степень сформированности в личности выпускника мотивационно-целевой структуры, позволяющей субъекту эффективно осуществлять практическую деятельность. Психологическая готовность к профессиональной деятельности включает в себя помимо мотивационно-целевого блока также операциональный блок — степень освоения профессионально значимых навыков, индивидуально-типологические особенности человека

(степень соответствия их профессии). Важным является мотивационно-целевой аспект психологической готовности, предполагая, что именно в мотивационной сфере отражаются и проявляются наиболее значимые характеристики психологической готовности к труду.

Мотивация учебно-профессиональной деятельности курсантов, процесс динамической настроенности на достижение определенных целей, которые обусловлены иерархией лично-приемлемых ценностей в будущей профессии. Выбирая профессию, человек как бы «проецирует» свою мотивационную структуру на особенности будущей профессиональной деятельности. В процессе освоения профессии происходит развитие и трансформация мотивационной структуры субъекта деятельности.

Организация и методы исследования

Настоящая работа посвящена выявлению и описанию структурных компонентов готовности к будущей профессиональной деятельности у выпускников с разным типом профессиональной мотивации.

Эмпирическое исследование проводилось на базе учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации» (БГАА). В исследовании приняли участие курсанты в возрасте 19–23 лет. Выборка составила 120 человек, из них 90 юношей (что составляет 75 % от общего количества), и 30 девушек (25 % общей выборки). Большинство выборок испытуемых составляют представители мужского пола, что объясняется техническим профилем академии.

Для исследования выявления готовности к будущей профессиональной деятельности выпускников с разными типами профессиональной мотивации нами проводилось диагностическое исследование с использованием следующих методик:

1. Методика «Профессиональная мотивация учащихся» позволяет определить ведущий вид мотивации из четырех, которые выделяет автор методики: мотивы собственно труда, мотивы социальной значимости труда, мотивы самоутверждения в труде, мотивы профессионального мастерства. Далее подробно рассмотрим характеристику каждого вида мотива.

Мотивы собственно труда определяют труд как целесообразную деятельность человека, в процессе которой он при помощи орудий труда воздействует на природу и использует ее в целях создания предметов, необходимых для удовлетворения своих потребностей. Поэтому люди, которые выбрали первую группу мотивов, ценят труд как таковой.

Мотивы социальной значимости труда направлены на труд, который ценит общество. Люди, у которых преобладает эта группа мотивов, готовы прийти на помощь в любую сложную минуту, это люди не только слова, но и дела; они пользуются уважением у коллег и друзей.

Преобладание мотивов самоутверждения в труде свидетельствует о стремлении к самоутверждению в трудовой деятельности; такой человек ценит свою работу и выполняет ее качественно.

Мотивы профессионального мастерства указывают на направленность людей, у которых преобладает эта группа мотивов, на профессиональное мастерство в трудовой деятельности; такой человек ценит свою работу и выполняет ее качественно, постоянно повышая уровень своего мастерства. Люди из этой группы готовы прийти на помощь в любую сложную минуту, связанную с профессиональными вопросами. Эти люди пользуются уважением у коллег и друзей.

2. Методика «Мотивы выбора профессии» Р. В. Овчарова [1] позволяет определить ведущий тип мотивации при выборе профессии. Соответствующий опросник состоит из двадцати утверждений, характеризующих любую профессию, и позволяет оценить, в какой мере каждое из них повлияло на выбор. С помощью методики можно выявить преобладающий вид мотивации (внутренние индивидуально-значимые мотивы, внутренние социально-значимые мотивы, внешние положительные мотивы и внешние отрицательные мотивы). Внутренние мотивы выбора той или иной профессии — ее общественная и личная значимость; удовлетворение, которое приносит работа благодаря ее творческому характеру; возможность общения, руководства другими людьми и т. д. Внутренняя мотивация возникает из потребностей самого человека, поэтому на ее основе человек трудится с удовольствием, без внешнего давления.

Внешняя мотивация — это заработок, стремление к престижу, боязнь осуждения, неудачи и т. д. Внешние мотивы можно разделить на положительные и отрицательные. К положительным мотивам относятся: материальное стимулирование, возможность продвижения по службе, одобрение коллектива, престиж, т. е. стимулы, ради которых человек считает нужным приложить свои усилия. К отрицательным мотивам относятся воздействия на личность путем давления, наказаний, критики, осуждения и других санкций негативного характера.

3. Методика определения нервно-психической устойчивости и риска дезадаптации в стрессе «Прогноз» рекомендуется к применению при подборе лиц, пригодных для работы в экстремальных условиях. Методика представляет собой опросник, состоящий из 84 утверждений, на которые испытуемым предлагается дать краткий ответ «да» или «нет». Методика имеет обратную шкалу: большое число баллов указывает на большую выраженность нервно-психической неустойчивости (меньшей стрессоустойчивости) [3].

4. В рамках методики «Диагностика профессиональной направленности студентов» Т. Д. Дубовицкой [7] профессиональная направленность рассматривается и как установка на определенный вид деятельности, принятие ее целей и задач на основе сформировавшейся потребности в получении профессиональных знаний, и как системообразующий фактор профессионализации личности, что выражается в готовности построения профессиональной карьеры.

На основании рассмотренных методик в качестве дополнительного средства получения данных была разработана анкета «Готовность к выбранной-

профессии», с помощью которой можно выявить интерес к выбранной профессии, какими качествами, знаниями, умениями и навыками необходимо обладать человеку, выбравшему профессию, связанную с выполнением технического обслуживания авиационной техники.

Исследование мотивации профессиональной деятельности и уровня профессиональной направленности курсантов

Результаты исследований с использованием методики «Профессиональная мотивация учащихся» (А. А. Крылов) (таблица 1, рисунок 1) показывают, что наиболее выраженными у курсантов выпускных курсов являются мотивы самоутверждения в труде — 34,3 % (абсолютная величина (АВ) составила 41 человек), на следующем месте — мотивы социальной значимости труда — 26,6 % (32 человека), затем — мотивы собственно труда — 21,6 % (26 человек) и менее всего выражены мотивы профессионального мастерства — 17,5 % (21 человек).

Причем, основной группой мотивов являются мотивы самоутверждения в труде (34,3 %): ценность своей работы и качественное ее выполнение. Respondенты, которые сделали выбор этой группы мотивов, готовы прийти на помощь в любую сложную минуту. Они уважаемы коллегами и друзьями. У них присутствует потребность чувствовать себя частью коллектива, иметь свой круг общения. Следующая

группа мотивов «Мотивы социальной значимости труда» является второй по значимости (26,6 %). Курсанты, выбравшие эту группу мотивов, ориентированы на труд, нужный обществу. Они готовы помочь в любой сложной ситуации, это люди, у которых слова не расходятся с делами; они пользуются уважением у коллег и друзей.

Что касается третьей по значимости группы мотивов, которой было отдано предпочтение, это группа «Мотивы собственно труда» (21,6 %). Для курсантов, выбравших эту группу мотивов, целесообразна деятельность человека, в процессе которой он при помощи орудий труда воздействует на природу и использует ее в целях создания предметов, необходимых для удовлетворения своих потребностей.

Группа мотивов профессионального мастерства также имеется, хотя она и самая малочисленная (17,5 %). Курсанты, у которых преобладает эта группа мотивов, направлены на профессиональное мастерство в трудовой деятельности, они ценят свою работу и выполняют ее качественно, постоянно повышая уровень своего мастерства. Они готовы оказать любую профессиональную помощь в случае необходимости.

Анализ полученных результатов показывает, что курсанты старших курсов, принимавших участие в опросе, ориентированы на самоутверждение в труде и социально значимый труд, что объясняется не вполне сформированной мотивацией на совершенствование себя в выбранной профессии (соответ-

Таблица 1 — Результаты исследования профессиональной мотивации

Мотивы профессиональной деятельности							
Мотивы профессионального мастерства		Мотивы самоутверждения в труде		Мотивы социальной значимости труда		Мотивы собственно труда	
АВ	%	АВ	%	АВ	%	АВ	%
21	17,5	41	34,3	32	26,6	26	21,6

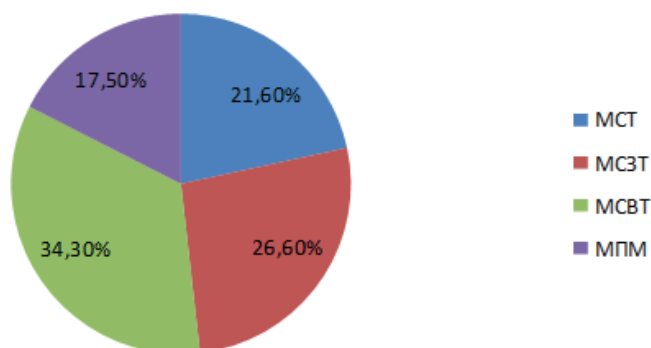


Рисунок 1 — Процентное соотношение профессиональной мотивации:
МСВТ — мотивы самоутверждения в труде; МСЗТ — мотивы социальной значимости труда;
МСТ — мотивы собственно труда; МПМ — мотивы профессионального мастерства

Таблица 2 — Результаты исследования уровня профессиональной направленности

Уровень профессиональной направленности					
Низкий уровень		Средний уровень		Высокий уровень	
АВ	%	АВ	%	АВ	%
13	10	55	46	52	44

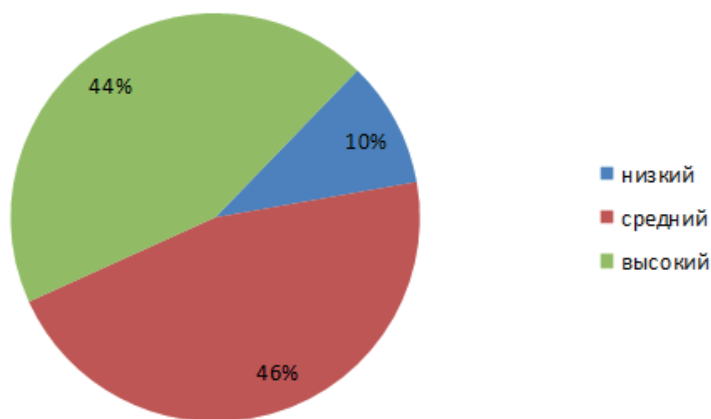


Рисунок 2 — Процентное соотношение уровней профессиональной направленности

ствующий показатель имеет самое низкое значение по сравнению с другими — 17,5 %). Полученные результаты находят свое подтверждение в работах отечественных специалистов, в частности, в обосновании структуры мотивационной сферы (В. В. Сорочан) и исследованиях мотивов выбора профессии и места работы (Э. С. Чугунова).

Для изучения уровня профессиональной направленности у курсантов нами была использована методика «Диагностика профессиональной направленности студентов» (Т. Д. Дубовицкая). Обобщенные эмпирические данные (таблица 2, рисунок 2) показывают, что наиболее выраженным является средний уровень профессиональной направленности — 46 % (55 человек), далее высокий уровень — 44 % (52 человека) и низкий уровень присущ 10 % (13 человек).

Респонденты, сделавшие выбор среднего уровня профессиональной направленности (их большинство — 46 %), не совсем готовы к профессиональной деятельности после окончания учебного заведения. Они предполагают продолжить обучение или переквалифицироваться на специалиста другого профиля. Близкие значения имеет и высокий уровень профессиональной направленности (44 %), что свидетельствует о том, что значительная часть курсантов стремится к овладению избранной профессией. Профессиональная деятельность в авиационной отрасли нравится им, они хотят в будущем работать и дальше совершенствоваться в этой области. В свободное время они занимаются делами, имеющими отношение к будущей профессии, имеют круг знакомых специалистов, считают выбранную профессию делом своей жизни.

Третьим по значимости уровнем профессиональной направленности, является низкий уровень (10 %), 13 курсантов вынужденно продолжают учебу. Поступление в учреждение образования обусловлено не интересом к будущей профессии и желанием работать по получаемой специальности, а другими причинами, например, подчинением требованиям родителей, близостью к дому и др. Курсанты не видят ничего хорошего для себя в будущей профессии, она им малоинтересна, при возможности хотят получить другую специальность.

В исследовании принимали участие курсанты старших курсов БГАА, до окончания учреждения образования им остается еще около 6 месяцев, в течение которых целесообразно провести мероприятия, направленные на повышение уровня их готовности к профессиональной деятельности при помощи коррекционно-развивающей программы «Осознание своих профессиональных мотивов».

Исследование готовности к выбранной профессии

Полученные результаты подтверждаются данными исследования готовности к выбранной профессии с использованием анкеты «Готовность к выбранной профессии» и методики «Прогноз». Обобщенные данные представлены в таблице 3 и на рисунке 3.

Анализ представленных результатов исследования позволяет утверждать, что наиболее выраженным у выпускников является средний уровень — 68,3 % (82 человека) и низкий уровень — 30 % (36 человек). Высокий уровень представлен только у 1 человека (0,83 %), что скорее является случайной величиной.

Таблица 3 – Результаты исследования уровня готовности к выбранной профессии					
Уровень готовности к выбранной профессии					
Низкий уровень		Средний уровень		Высокий уровень	
АВ	%	АВ	%	АВ	%
36	30,00	82	68,30	1	0,83

Таблица 4 – Результаты исследования уровня нервно-психической устойчивости							
Уровень нервно-психической устойчивости							
Высокая нервно-психическая устойчивость		Хорошая нервно-психическая устойчивость		Удовлетворительная нервно-психическая устойчивость		Неудовлетворительная нервно-психическая устойчивость	
АВ	%	АВ	%	АВ	%	АВ	%
14	12	57	48	46	38	3	2

Было проведено также изучение уровня нервно-психической устойчивости курсантов старших курсов (таблица 4).

Анализ представленных результатов свидетельствует о том, что наиболее выраженной у выпускников является хорошая 48 % (57 человек) и удовлетворительная 38 % (46 человек) нервно-психическая устойчивость. Курсанты с хорошей нервно-психической устойчивостью готовы к стрессовым ситуациям в профессиональной деятельности. Они предполагают наличие в своей работе ситуаций, связанных с риском и опасностью. В то же время у респондентов с удовлетворительной нервно-психической устойчивостью (38 %) возможны склонности к срывам нервной системы при значительных физических и психических нагрузках. Высокая нервно-психическая устойчивость наблюдается у 14 человек из опрошенных (12 %) и неудовлетворительная нервно-психическая устойчивость – у 3 человек (2 %).

Высокая степень нервно-психической устойчивости свидетельствует о наличии у курсантов личностных качеств, ресурсов и резервных психофизиологических возможностей организма, обеспе-

чивающих оптимальное функционирование индивида в неблагоприятных условиях профессиональной среды.

Курсанты с неудовлетворительной нервно-психической устойчивостью полностью не готовы к профессиональной деятельности по профессии, которой они обучаются. У них наблюдается отсутствие личностных качеств, ресурсов и резервных психофизиологических возможностей организма, необходимых для оптимального функционирования в возможных неблагоприятных условиях профессиональной среды.

Заключение

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в целом курсанты старших курсов готовы к стрессовым и рискованным ситуациям в неблагоприятных условиях профессиональной деятельности, но многим в разной степени требуется коррекционно-развивающая помощь, направленная на повышение готовности к профессиональной деятельности.

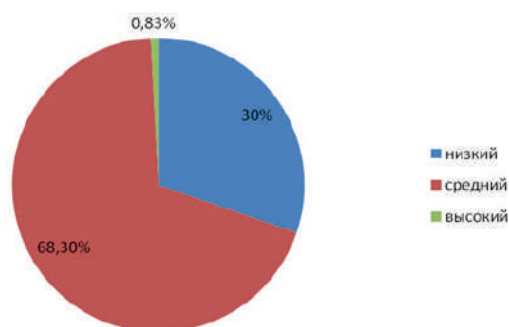


Рисунок 3 – Процентное соотношение уровней готовности к выбранной профессии

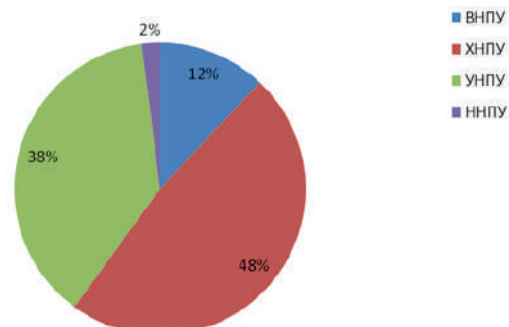


Рисунок 4 – Процентное соотношение уровней нервно-психической устойчивости у выпускников

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Додонов, Б. И. Структура и динамика мотивов деятельности / Б. И. Додонов // Психологический журнал. – 2000. – № 4. – С. 126.
2. Бодалев, А. А. Общая психодиагностика / А. А. Бодалев, В. В. Столин. – СПб.: «Речь», 2004. – 440 с.
3. Дубовицкая, Т. Д. Диагностика уровня профессиональной направленности студентов / Т. Д. Дубовицкая // Психологическая наука и образование. – 2004. – № 2. – С. 82–86.
4. Забродин, Ю. М. Мотивационно-смысловые связи в структуре направленности человека / Ю. М. Забродин, Б. А. Сосновский // Психологический журнал. – 2000. – № 6. – С. 100–110.
5. Абаева, Е. В. Психологическая поддержка личности на начальном этапе профессионализации (на этапе вхождения в вузовское пространство): автореф. дис. ... канд. психол. наук: 19.00.13 / Е. В. Абаева. – Краснодар, 2003. – 23 с.
6. Иноземцева, А. Н. Влияние профессионального самосознания студентов на формирование психологической готовности к профессиональной деятельности: дис. ... канд. психол. наук: 19.00.13 / А. Н. Иноземцева. – М., 2002. – 225 с.
7. Ильин, Е. П. Мотивация и мотивы / Е. П. Ильин. – СПб.: Питер, 2000. – 230 с.
8. Лазарев, С. В. Развитие психологической готовности молодых авиаинженеров к военно-профессиональной деятельности: дис. канд. психол. наук: 19.00.14 / С. В. Лазарев. – М., 2000. – 240 с.
9. Майерс, Д. Социальная психология / пер. с англ. Д. Майерс. – СПб.: Питер, 2002. – 688 с.
10. Узнадзе, Д. Н. Психология установки / Д. Н. Узнадзе. – СПб.: Питер, 2001. – 416 с.
11. Митина, А. М. Зарубежные исследования учебной мотивации взрослых / А. М. Митина // Вестник Сер.14. Психология. – 2004. – № 2. – С. 70.
12. Маслоу, А. Мотивация и личность / А. Маслоу. – СПб.: Питер, 1999. – 426 с.
13. Санжаева, Р. Д. Психологические механизмы формирования готовности человека к деятельности: дис. ... д-ра психол. наук: 19.00.01 / Р. Д. Санжаева. – Новосибирск, 1997. – 354 с.
14. Практикум по общей, экспериментальной и прикладной психологии / под ред. А. А. Крылова, С. А. Маничева. – СПб.: Питер, 2003. – 560 с.
15. Степанский, В. И. Влияние мотивации достижения успеха и избегания неудачи на регуляцию деятельности / В. И. Степанский // Вопросы психологии. – 1998. – № 6. – С. 15–17.

REFERENCES

1. Dodonov, B. I. Structure and dynamics of motives of activity / B. I. Dodonov // Psychological journal. – 2000. – No. 4. – P. 126.
2. Bodalev, A. A. General psychodiagnostics / A. A. Bodalev, V. V. Stolin, St. Petersburg : "Speech", 2004. – 440 p.
3. Dubovitskaya, T. D. Diagnostics of the level of professional orientation of students / T. D. Dubovitskaya // Psychological science and education. – 2004. – No. 2. – P. 82–86.
4. Zabrodin, Yu. M. Motivational and semantic connections in the structure of human orientation / Yu. M. Zabrodin, B. A. Sosnovsky // Psychological Journal. – 2000. – No. 6. – P. 100–110.
5. Abayeva, E. V. Psychological support of the individual at the initial stage of professionalization (at the stage of entering the university space): abstract of the dissertation of the candidate. psychological sciences / E. V. Abayeva. – Krasnodar, 2003. – 23 p.
6. Inozemtseva, A. N. The influence of professional self-awareness of students on the formation of psychological readiness for professional activity: Dis. cand. psychological sciences : 19.00.13 / A. N. Inozemtseva. – Moscow, 2002. – 225 p.
7. Ilyin, E. P. Motivation and motives / E. P. Ilyin. – St. Petersburg: Peter, 2000. – 230 p.
8. Lazarev, S. V. Development of psychological readiness of young aviation engineers for military professional activity: Dis. cand. Psychological sciences: 19.00.14 / S. V. Lazarev. – Moscow, 2000. – 240 p.
9. Myers, D. Social Psychology / Transl. from English D. Myers. – St. Petersburg: Peter, 2002. – 688 p.
10. Uznadze, D. N. Psychology of installation / D. N. Uznadze. – St. Petersburg: Peter, 2001. – 416 p.
11. Mitina, A. M. Foreign studies of educational motivation of adults / A. M. Mitina // Bulletin Ser.14. Psychology. – 2004. – No. 2. – P. 70.
12. Maslow, A. Motivation and personality / A. Maslow. – St. Petersburg: Peter, 1999. – 426 p.
13. Sanzhaeva, R. D. Psychological mechanisms of formation of human readiness for activity: Dis. doctor of Psychological Sciences : 19.00.01 / R. D. Sanzhaeva. – Novosibirsk, 1997. – 354 p.
14. Workshop on general, experimental and applied psychology / Edited by A. A. Krylov, S. A. Manicheva. – St. Petersburg: Peter, 2003. – 560 p.
15. Stepansky, V. I. The influence of motivation to achieve success and avoid failure on the regulation of activity / V. I. Stepansky // Questions of psychology. – 1998. – No. 6. – P. 15–17.

*Статья поступила в редакцию
07.12.2022*



ЮРИДИЧЕСКИЕ НАУКИ

ИСТОРИЯ ЭВОЛЮЦИИ И РАЗВИТИЯ ПРАВОВОГО ИНСТИТУТА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТОВ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

Гринев Игорь Викторович – соискатель кафедры теории и истории государства и права юридического факультета Белорусского государственного университета, Республика Беларусь

Igor Grinov – Postgraduate student of the Department of Theory and History of State and Law of the Faculty of Law of the Belarusian State University, Republic of Belarus

Аннотация: в статье рассматриваются вопросы эволюции правового регулирования обеспечения безопасности полетов воздушных судов Республики Беларусь, развития его законодательства. Приводятся источники международного и национального права, регулирующие указанную сферу, а также органы и организации, осуществляющие правовое регулирование и управление. Делается вывод о соответствии законодательства Республики Беларусь в обеспечении безопасности полетов международным нормам.

Ключевые слова: безопасность полетов, воздушное право, история права, институт права, правовое регулирование.

Abstract: the article examines the evolution of the legal regulation of the safety of aircraft flights of the Republic of Belarus, the development of its legislation. The sources of international and national law regulating this sphere, as well as bodies and organizations carrying out legal regulation and management are given. The conclusion is made about the compliance of the legislation of the Republic of Belarus in the field of flight safety with international requirements.

Keywords: safety, air law, history of law, institute of law, legal regulation.

Введение

Соглашение о создании Содружества Независимых Государств, положило начало коренному изменению правового регулирования воздушных передвижений и использования воздушного пространства над территорией всех членов Содружества [1]. В Беларуси это привело к преобразованию Белорусского управления гражданской авиации, переводу значительной части военно-транспортной авиации в гражданскую, закрытию аэропортов в областных и районных центрах, слиянию авиации ПАНХ с авиацией, выполняющей регулярные перевозки пассажиров, изменению организации полетов авиации ДОСААФ (БелОСТО), признанию государственного суверенитета над своим воздушным пространством. Как отмечает Ф. И. Сапрыкин: «Распад СССР повлек за собой расчленение единого воздушного пространства, принадлежавшего одновременно всем республикам бывшего СССР, в котором, в среднем за сутки выполнялось до 100 тыс. полетов воздушных судов, производилось более 100 тыс. запусков ракет и снарядов» [2, с. 14]. В связи с этим также изменилось состояние безопасности полетов

в Республике Беларусь, его нормативное регулирование, что предопределило его эволюцию в самостоятельный правовой институт.

Основная часть

Признавая в Соглашении о создании Содружества Независимых Государств, что Союз ССР прекращает свое существование как субъект международного права и геополитическая реальность, на территориях государств его подписавших не допускается применение норм Союза ССР, а деятельность государственных органов прекращается, Соглашение вступило во внутреннее противоречие с указанными в нем же положениями о гарантиях выполнения международных обязательств Союза ССР, обеспечении безопасности полетов, свободы передвижения и передачи информации [1, ст. 5, 6, 11, 12].

Указанные обстоятельства превращали авиационную деятельность вновь образованных государств в небезопасную, а любые полеты через их территорию — в несанкционированные. Разрешить указанные проблемы были призваны новые соглашения.

Эти соглашения должны были урегулировать вопросы соблюдения общепризнанных принципов и норм международного права, ранее заключенных международных договоров СССР, сохранение действия Воздушного кодекса СССР, единого управления воздушным движением, не нарушая при этом принципов о едином воздушном пространстве, полном и исключительном суверенитете над воздушным пространством с учетом требований Международной организации гражданской авиации (ИКАО) по безопасности полетов: в области летной годности, правил сертификации, поиска и спасания, расследования авиационных происшествий [3, ст. 1, 3, 4, 6, 7].

Подписанное в Минске 12–25 декабря 1991 года «Соглашение о гражданской авиации и об использовании воздушного пространства» [3] в значительной мере способствовало укреплению безопасности полетов. Кроме того, 15 мая 1992 года в Ташкенте принято «Соглашение об использовании воздушного пространства», разрешившее свободное использование общего воздушного пространства СНГ также и для самолетов военной авиации [4].

В соответствии с Соглашением о гражданской авиации и об использовании воздушного пространства от 12–25 декабря 1991 года общее руководство и координация вопросов авиации и использования воздушного пространства возлагались на образованный Совет по авиации и использованию воздушного пространства, а непосредственное управление — на Межгосударственный авиационный комитет (МАК) как постоянно действующий исполнительный орган, наделенный наднациональными правами, в том числе по сертификации воздушных судов и расследованию авиационных происшествий [3, ст. 8, 9].

При этом согласованные государствами положения были временными и действовали до принятия ими своих актов воздушного законодательства, регулирующих указанную сферу деятельности [3, ст. 4].

Во исполнение Минского и Ташкентского соглашений в Республике Беларусь были разработаны и приняты: Воздушный кодекс (11 января 1999 года № 240-З), Программа обеспечения безопасности полетов воздушных судов гражданской авиации Республики Беларусь (утверждена Постановлением Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь от 05 июня 2009 года № 53), а также изданы Авиационные правила «Расследование авиационных происшествий и инцидентов» (утверждены Постановлением министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь от 30 декабря 2009 года № 103).

С 1993 года Республика Беларусь является членом ИКАО (Конвенция Международной организации гражданской авиации ратифицирована в Республике Беларусь: Постановлением Верховного Совета Республики Беларусь № 2022-XII от 09.12.1992, дата присоединения 04.06.1993, вступило в силу 04.07.1993).

В период с 1992 года по 2006 год были образованы органы для руководства и обеспечения работы воздушного транспорта Республики Беларусь:

- в 1992 году — Комитет по использованию воздушного пространства и управлению воздушным движением [5], который в 1995 году был преобразован в Государственный комитет по авиации

Республики Беларусь [6], в 2001 году получил новую редакцию Положения о комитете [7], а в 2006 году преобразован в Департамент по авиации, который структурно вошел в Министерство транспорта и коммуникаций Республики Беларусь [8];

- в 1996 году было создано Республиканское унитарное предприятие по аэронавигационному обслуживанию воздушного движения «Белаэронавигация» [9].

В 2019 году из Департамента по авиации выделено в качестве юридического лица, оставаясь ему подчиненным, Государственное учреждение «Авиационная инспекция» [10].

Следует отметить, что за период после принятия воздушного кодекса, авиационных правил и разработки программы в мировой гражданской авиации произошли существенные изменения законодательства: вместо действовавшего с 1984 года в сфере регулирования безопасности полетов Руководства по предотвращению авиационных происшествий (РПАП ИКАО-84) (Doc. 9422-AM/923) [11], были изданы: новое Руководство по управлению безопасностью полетов (РУБП ИКАО) (Doc. 9859), в редакции 2006, 2009, 2013, 2018 годов [12]; принято новое Приложение 19 к Конвенции о международной гражданской авиации; Управление безопасностью полетов, в редакции 2013, 2016 годов [13].

Указанные правовые акты существенно изменили концепцию обеспечения безопасности полетов: от концепции предотвращения авиационных происшествий, суть которой в признании возможности достижения абсолютной безопасности, т. е. возможности снижения авиационных происшествий до нулевого уровня, на концепцию управления безопасностью полетов, суть которой в достижении минимально возможного практического уровня аварийности и поддержания его на этом уровне.

На основе требования ст. 37 Конвенции ИКАО 1944 года в государствах-участниках это потребовало [14]:

- а) изменить правовой механизм обеспечения безопасности полетов; разработать и принять государственную программу по безопасности полетов (ГосПБП); установить нормативные показатели приемлемого и заданного уровней аварийности, минимальные требования к безопасности полетов [15];

- б) гармонизировать национальное законодательство, во исполнении чего: нормативно обязать авиационные предприятия в государстве разрабатывать вместо «программ предотвращения авиационных происшествий» новые локальные нормативные акты: «системы управления безопасностью полетов» (СУБП предприятия), согласованные с государственной программой по безопасности полетов [13, п. 3.2.1.1].

В связи с этим и на основе вышеназванных требований в Республике Беларусь были приняты следующие документы:

- вместо Воздушного кодекса 1999 года был введен в действие Воздушный кодекс от 16 мая 2006 года № 117-З;

- Авиационные правила «Расследование авиационных происшествий и инцидентов» 2009 года были заменены на Авиационные правила «Расследование

авиационных происшествий и инцидентов» (утверждены Постановлением министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь от 29 мая 2020 года № 20);

- Программа обеспечения безопасности полетов воздушных судов гражданской авиации Республики Беларусь 2009 года была заменена Национальной Программой по безопасности полетов гражданской авиации Республики Беларусь (утверждена Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 22 августа 2019 года № 563).

Введение в действие всех этих нормативных актов стало основой формирования правового института обеспечения безопасности полетов в Республике Беларусь.

Заключение

Таким образом, на сегодняшний день Республика Беларусь обладает достаточно развитым воздушным законодательством в области обеспечения безопасности полетов, позволяющим безопасно организовывать и выполнять полеты в воздушном пространстве Республики Беларусь; воздушном пространстве иностранных государств выделенном для международных полетов; международном воздушном пространстве, что подтверждается проверкой Республики Беларусь Международной организацией гражданской авиации в рамках Универсальной программы проверок организации контроля за обеспечением безопасности полетов в 2015 году (УТПКБП) [16].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Соглашение о создании Содружества Независимых Государств [Электронный ресурс] : [заключено в г. Минске 08.12.1991 г.] // илех : информ. правовая система / ООО «ЮрСпектр», Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2023.
2. Сапрыкин Ф. И. Международно-правовые проблемы использования воздушного пространства государств-участников СНГ : автореф. дис. ... канд. юрид. наук : 12.00.10 / Дипломат. акад. М-ва иностр. дел Рос. Федерации. – М., 1996. – 23 с.
3. Соглашение о гражданской авиации и об использовании воздушного пространства [Электронный ресурс] : [заключено в г. Минске 12.12.1991 – 25.12.1991] // илех : информ. правовая система / ООО «ЮрСпектр», Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2023.
4. Соглашение об использовании воздушного пространства [Электронный ресурс] : [заключено в г. Ташкенте 15.05.1992] // илех : информ. правовая система / ООО «ЮрСпектр», Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2023.
5. Вопросы Комитета по использованию воздушного пространства и управлению воздушным движением при Совете Министров Республики Беларусь [Электронный ресурс] : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 16 июля 1992 г., № 441 // илех : информ. правовая система / ООО «ЮрСпектр», Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2023.
6. Вопросы Государственного комитета по авиации Республики Беларусь [Электронный ресурс] : постановление Каб. Министров Респ. Беларусь, 14 июня 1995 г., № 303 // илех : информ. правовая система / ООО «ЮрСпектр», Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2023.
7. Об утверждении Положения о Государственном комитете по авиации Республики Беларусь [Электронный ресурс] : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 12 июня 2001 г., № 872 // илех : информ. правовая система / ООО «ЮрСпектр», Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2023.
8. Положение о Департаменте по авиации Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь [Электронный ресурс] : утв. постановлением Совета Министров Респ. Беларусь, 31 июля 2006 г., № 985 // илех : информ. правовая система / ООО «ЮрСпектр», Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2023.
9. О повышении эффективности управления авиацией [Электронный ресурс] : Указ Президента Респ. Беларусь, 4 апр. 1995 г., № 126 // илех : информ. правовая система / ООО «ЮрСпектр», Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2023.
10. О создании учреждения [Электронный ресурс] : Указ Президента Респ. Беларусь, 4 сент. 2019 г., № 328 // илех : информ. правовая система / ООО «ЮрСпектр», Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2023.
11. Руководство по предотвращению авиационных происшествий [Электронный ресурс]. – 1-е изд. – Монреаль : ИКАО, 1984. – Режим доступа: https://sparcatc.ru/files/ICAO_Doc-9422-Rukovodstvo-po-predotvrashcheniyu-aviacionnyh-proisshestiiv.pdf. – Дата доступа: 27.03.2023.
12. Руководство по управлению безопасностью полетов [Электронный ресурс]. – 4-е изд. – Монреаль : ИКАО, 2018. – Режим доступа: <https://e.eruditor.one/file/2992363/>. – Дата доступа: 27.03.2023.
13. Приложение 19 к Конвенции о международной гражданской авиации. Управление безопасностью полетов [Электронный ресурс]. – 2-е изд. – Монреаль : ИКАО, 2016. – Режим доступа: https://caa.gov.kz/storage/app/media/%D0%B4%D1%83%D0%B1%D0%BF/AN19_cons_RU.pdf. – Дата доступа: 27.03.2023.
14. Конвенция о международной гражданской авиации [Электронный ресурс] : [заключена в г. Чикаго 07.12.1944 г.] // илех : информ. правовая система / ООО «ЮрСпектр», Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2023.
15. Руководство ИКАО по управлению безопасностью полетов (Doc 9859). – 1-е изд. – Монреаль : ИКАО, 2006. – 364 с.
16. Safety Audit Results: USOAP interactive viewer [Electronic resource] // ICAO. – Mode of access: <https://www.icao.int/safety/Pages/USOAP-Results.aspx>. – Date of access: 27.03.2023.

REFERENCES

1. Dodonov, B. I. Structure and dynamics of motives of activity / B. I. Dodonov // Psychological journal. – 2000. – No. 4. – P. 126.
2. Bodalev, A. A. General psychodiagnostics / A. A. Bodalev, V. V. Stolin, St. Petersburg : "Speech", 2004. – 440 p.
3. Dubovitskaya, T. D. Diagnostics of the level of professional orientation of students / T. D. Dubovitskaya // Psychological science and education. – 2004. – No. 2. – P. 82–86.
4. Zabrodin, Yu. M. Motivational and semantic connections in the structure of human orientation / Yu. M. Zabrodin, B. A. Sosnovsky // Psychological Journal. – 2000. – No. 6. – P. 100–110.
5. Abayeva, E. V. Psychological support of the individual at the initial stage of professionalization (at the stage of entering the university space): abstract of the dissertation of the candidate. psychological sciences / E. V. Abayeva. – Krasnodar, 2003. – 23 p.
6. Inozemtseva, A. N. The influence of professional self-awareness of students on the formation of psychological readiness for professional activity: Dis. cand. psychological sciences : 19.00.13 / A. N. Inozemtseva. – Moscow, 2002. – 225 p.
7. Ilyin, E. P. Motivation and motives / E. P. Ilyin. – St. Petersburg: Peter, 2000. – 230 p.
8. Lazarev, S. V. Development of psychological readiness of young aviation engineers for military professional activity: Dis. cand. Psychological sciences: 19.00.14 / S. V. Lazarev. – Moscow, 2000. – 240 p.
9. Myers, D. Social Psychology / Transl. from English D. Myers. – St. Petersburg: Peter, 2002. – 688 p.
10. Uznadze, D. N. Psychology of installation / D. N. Uznadze. – St. Petersburg: Peter, 2001. – 416 p.
11. Mitina, A. M. Foreign studies of educational motivation of adults / A. M. Mitina // Bulletin Ser.14. Psychology. – 2004. – No. 2. – P. 70.
12. Maslow, A. Motivation and personality / A. Maslow. – St. Petersburg: Peter, 1999. – 426 p.
13. Sanzhaeva, R. D. Psychological mechanisms of formation of human readiness for activity: Dis. doctor of Psychological Sciences : 19.00.01 / R. D. Sanzhaeva. – Novosibirsk, 1997. – 354 p.
14. Workshop on general, experimental and applied psychology / Edited by A.A. Krylov, S.A. Manicheva. – St. Petersburg: Peter, 2003. – 560 p.
15. Stepansky, V. I. The influence of motivation to achieve success and avoid failure on the regulation of activity / V. I. Stepansky // Questions of psychology. – 1998. – No. 6. – P. 15–17.

Статья поступила в редакцию
13.04.2023

Лаборатория диагностики и прототипирования авиационных конструкций учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации» приглашает к сотрудничеству



1. **Tescan Mira 3 LMH.** Новое поколение сканирующих электронных микроскопов с катодом Шоттки TESCAN MIRA сочетает в себе преимущества современных технологий: модернизированная электроника для ускоренного получения изображений; сверхбыстрая система сканирования с компенсацией статических и динамических aberrаций изображения. Доступное увеличение микроскопа от 2 до 1 000 000. Возможность проведения энергодисперсионного микроанализа.



аналоги. Такие выдающиеся характеристики обусловлены самой большой вакуумной камерой, имеющей полную термостабилизацию, и вертикально расположенную оптическую систему, улучшающую соотношение сигнал/шум и сохраняющей компактность прибора.



3. **3d-принтер Fortus 450mc.** Трехмерная производственная система, позволяющая создавать точные воспроизводимые детали аддитивным способом на основе твердотельной трехмерной модели: авиационные, машиностроительные и строительные конструкции в масштабе для изучения опытных конструкций, технологические приспособления и инструменты и конечные детали, а также функциональные прототипы, которые выдерживают жесткое тестирование. Высокоэффективный материал Ultem используется для создания деталей фюзеляжа, крыльев благодаря высокой прочности и малому удельному весу.



4. **Трёхкоординатный фрезерный станок с ЧПУ Clever CNC Rh300.** Предназначен для обработки легкообрабатываемых материалов с высокой точностью и производительностью. Пригоден для обработки стали и труднообрабатываемых материалов на щадящих режимах.



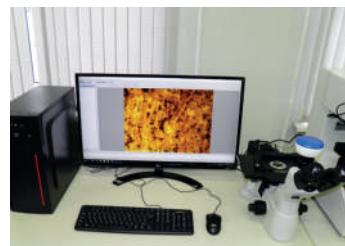
5. **3d-сканер Nikon Altera 7.5.5 с LC15 Dx.** Координатно-измерительная машина премиум-класса серии ALTERA. с лазерным сканированием сложных криволинейных поверхностей. Точность сканирования достигается до 1,8 мкм за счёт керамической конструкция с почти идеальной удельной жёсткостью и большой устойчивостью к изменениям температуры, гарантирующая исключительные и стабильные результаты в любых производственных условиях.



материале, сосудов давления, котлов, транспортных и мостовых конструкций и других объектов. Переносной и прочный прибор объединяет преимущества фазированной решетки с обычным ультразвуковым дефектоскопом, отвечающим принятым нормам.



7. **Гидравлическая разрывная машина Kason WAW-300.** Испытательная гидравлическая разрывная машина предназначена для определения механических характеристик различных материалов при статическом растяжении, сжатии, изгибе и сдвиге. Машина применяется в металлургии, машиностроении, в производстве неметаллических материалов и изделий из них, в том числе при проведении научных исследований. Принцип действия машин серии WAW основан на преобразовании тензометрическим датчиком давления нагрузки, приложенной к испытываемому образцу, в электрический сигнал, изменяющийся пропорционально этой нагрузке.



8. **Металлографический комплекс Autoscan.** Предназначена для анализа изображений посредством визуального сравнения их с эталонными изображениями по некоторой заданной методике. Программное обеспечение имеет возможности: - создание составных изображений из набора изображений образца для получения более полной информации об образце; - приведение масштаба анализируемого изображения к масштабу эталонных изображений для их точного визуального сравнения на экране компьютера; - ручное измерение длин и площадей на анализируемом изображении.



9. **Твердомер аналоговый AFFRI-URBV-V.** Предназначен для измерения твердости металлов и сплавов, пластиков, мягкой и твердой резины по стандартизованным шкалам твердости Роквелла (HRA, HRB, HRC, HRN, HRT) по ГОСТ 9013-59, Виккерса (HV) по ГОСТ 2999-75, Бринелля (HB) по ГОСТ 9012-59.

10. **Твердомер AFFRI-MVDM8.** Предназначен для измерения микротвердости металлов и сплавов по шкалам Виккерса, в т. ч. поверхностных слоев металла при механической обработке, отдельных составляющих у структурно неоднородных сплавов, незначительных по толщине гальванических и других покрытий.



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.

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 A4, 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. Искользованные 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 подписуточных 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 (ГОСТ 7.1-2003). Цитированная 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 английский 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.

Структура списка литературы на английском языке отличается от предписанной ГОСТом (ГОСТ 7.1-2003). 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 [].

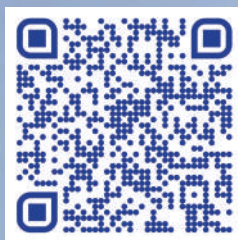
Названия статей (составных частей) из журналов, сборников и т. д., а также патентов, законов, ГОСТ, СНБ, ТКП, СНиП, СанПиН и т. д. только переводятся.

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.



РУБРИКИ ЖУРНАЛА

Технические науки

(проектирование и эксплуатация авиационной техники, навигация и управление воздушным транспортом, авиационная безопасность и безопасность полетов)

Педагогические науки

(профессиональная подготовка авиационных специалистов, развитие профессионального образования)

Юридические науки

(правовое регулирование в области гражданской авиации)

УСЛОВИЯ ОПУБЛИКОВАНИЯ В ЖУРНАЛЕ

Для опубликования статьи в журнале необходимо представить:

1. Экспертное заключение о возможности опубликования в открытых источниках печати в электронном виде в формате pdf (оригинальные экспертные заключения необходимо обязательно предоставить в оргкомитет).
2. 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. В названии файла указывать фамилию автора (либо соавторов через запятую) в именительном падеже, а также первые два-три слова из названия статьи.
 - Бумажный вариант статьи, подписанный всеми авторами (подписи должны быть заверены) направлять по адресу редакционной коллегии с пометкой «Научно-практический журнал «Авиационный вестник».

Языки материала статьи: белорусский, русский, английский.

Плата за публикацию не взимается.

Электронная версия журнала будет опубликована на сайте учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации».

bgaa.by

Журнал включен в перечень Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований по техническим наукам (эксплуатация воздушного транспорта, навигация и управление воздушным транспортом) согласно приказу Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь № 94 от 01.04.2014 (в редакции приказа Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь 16.02.2021 № 36).

Журнал включен в РИНЦ (Российский индекс научного цитирования) Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU

АДРЕС РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

220096, г. Минск, ул. Уборевича, 77

Учреждение образования «Белорусская государственная академия авиации»

Телефон: +375 (17) 354-32-34

e-mail: avia.vestnik@bgaa.by

Подписано в печать 25.08.2023. Формат 60х90/8. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 4,65. Тираж 100 экз. Заказ №2308.

Полиграфическое исполнение:

ООО «НАВИТЕХ». Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий №2/194 от 23.02.2017.

220024, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Бабушкина, 6А, комн. 204.