

№ 4 ИЮЛЬ 2021
ISSN 2707-6989

БЕЛАОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
АКАДЕМИЯ НЕФАТЬИ

Авиационный вестник

*The aviation
herald*

Научно-практический журнал

Главный редактор
Андрей Шестопалов, директор БТАБ, Ред-
акция сайта БТАБ

Завістители головного редактора:
Д.І. Григор'єв, доктор фізико-математичних наук, професор кафедри Технічної експертизи
міністерства освіти і науки Республіки Білорусь;
А.А. Панасюк, кандидат фізико-математичних наук, професор кафедри Технічної експертизи
міністерства освіти і науки Республіки Білорусь.

Технический секретарь:
Д.А. Шаховской. Кандидат технических наук, инженер-технологический эксплуатации, подразделение «Борисоглебск» ОАО «Ростехнологии»

Редакция
Тематические соузы:
С.А.Чакаров, академик НАН Беларусь, доктор профессор, лауреат премии Президента Республики Беларусь НАН Беларусь, Рубенчука Беларусь.
А.Л.Любимов, академик НАН Беларусь, доктор физико-математических наук ФНЦ НАН Беларусь, Республика Беларусь.
Н.Г.Захарова, доцент, доктор физико-математических наук НАН Беларусь, Республика Беларусь.
А.Л.Бондарев, доктор физико-математических наук, профессор, заместитель генерального директора международных и экспортных материалов ФМК НАН Беларусь, Республика Беларусь.

МАК. Жандыл, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент Академии наук Республики Таджикистан, проректор по научной работе Таджикского национального университета им. Абуали ибн Сино в Республике Таджикистан, государственный советник третьей группы, Республика Таджикистан.

А.Х. Гильмурзинов, спикером Президиума Республики Татарстан, д-р-и-н., профессор заслуженный народный художник Республики Татарстан ФГБОУ ВО «Кинешемский государственный технический университет»

Российская Федерация,
МФ Финансовому Фонду Проректора по
наукам и развитию ТГУ Ленинградской Республики

А.И. Медведев, д-р. философии, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики ТГУ, лауреат премии Ростехнадзора
Денис Константинович Димитров, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики Томского государственного гуманитарного университета, лауреат премии Национальной науки и техники Российской Федерации, профессор РАН, член-корреспондент РАН, кандидат физико-математических наук.

Юридические науки
Б.Г. Глинка, доктор юридических наук,
профессор, МГУПП, Республика Беларусь;
В.С. Конинков, доктор юридических наук,
профессор кафедры физической пробы и приема
контрольных вынужденных изъятий в Университете
занятости Республики Беларусь;
Д.У. Родченко, кандидат юридических наук, доцент
Кафедры уголовного права и криминалистики
Гродненского государственного университета.

изданное НАУ, Ростовским Академическим издательством им. Аксакова, Институтом воздушного и космического права «Морозовка», Феодосийский Федоровский

Педагогические науки:
А.М. Волинко, доктор педагогических наук, профессор,
главный научный сотрудник лаборатории
лучистых излучений Института НУЗ, Республика Беларусь;
Д.В. Панах, доктор педагогических наук, профессор-
ректор по научной работе Министерства образования
и науки, заведующий кафедрой инженерной биотехнологии и
здравоохранения БГУИР, Республика Беларусь;
В.Г. Стаканов, кандидат педагогических наук, профессор,
заведующий лабораторией проблем воспитания
и воспитательной деятельности ИПК, Республика Беларусь.

АВИАЦИОННЫЙ ВЕСТНИК

Научно-практический журнал

СОДЕРЖАНИЕ

АВИАЦИЯ В ЛИЦАХ

- Дело для настоящих мужчин 4

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- | | |
|--|----|
| С. Василевич, М. Малько, Е. Шапорова. Определение энергии активации термической конверсии топлива на примере авиационного керосина | 8 |
| А. Капустин, О. Полетаева, К. Терещенко. Влияние конструктивных элементов авиационного бесконтактного генератора постоянного тока на качество электрической энергии | 15 |
| А. Шейников, А. Санька. Повышение чувствительности волоконно-оптического гироскопа при синусоидальной фазосдвигающей модуляции световых лучей | 20 |
| Л. Гречихин. Совместная статистическая и континуальная аэродинамика | 24 |
| В. Малкин, И. Рожков. Синтез инвариантного к параметрическим возмущениям контура угловой стабилизации беспилотного летательного аппарата по углу крена | 32 |
| А. Боровой, А. Кульпинович, К. Якуто. Определение местоположения источника радиоизлучения группой беспилотных летательных аппаратов с использованием разностно-дальномерной информации | 39 |
| А. Шегидевич, А. Жукова, Д. Щербунов, В. Котович. Противообледенные жидкости в гражданской авиации | 43 |
| А. Шегидевич, В. Степаненко, С. Юхневич. Концепция солнечной энергетической установки для энергообеспечения полетов беспилотной авиации | 49 |
| Е. Шапорова, А. Капустин, С. Стойко. Комплексная оценка состояния ГТД на основе трибодиагностики | 55 |

ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

- В. Шалупин, И. Родионова. Методика планирования учебных занятий по физической культуре со студентами вузов гражданской авиации в недельном учебном цикле* 62
О. Петровская, И. Разумник, Ю. Цыбукова, А. Петровская. Реализация моделей смешанного обучения в учебном процессе по общепрофессиональным дисциплинам 66

ЮРИДИЧЕСКИЕ НАУКИ

3. Халилова. Космическая политика Азербайджанской Республики и ее правовое регулирование 74
 3. Машарский, А. Странович, С. Стойко. Международный правовой режим нерегуляруемых воздушных сообщений 80

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@bsau.by
www.bsau.by

CONTENTS

AVIATION IN PERSONS

Business for real men	4
-----------------------------	---

TECHNICAL SCIENCES

S. Vasilevich, M. Malko, E. Shaporova. Determination of activation energy of thermal conversion of fuel on the example of aircraft kerosene	8
A. Kapustin, V. Poletayeva, K. Tereshchenko. The influence of construction components of aircraft non-contact dc generators on the quality of electric energy	15
A. Sheinikov, A. Sanko. Increasing the sensitivity of the fiber-optical gyroscope at sinusoidal phase-shifting modulation of light rays	20
L. Gretchikhin. Joint statistical and continual aerodynamics	24
V. Malkin, I. Rozhkov. Synthesis of the invariant to parametric disturbances of the angular stabilization circuit of an unmanned aircraft at the roll angle	32
A. Borovoi, A. Kulpanovich, K.I. Yakuto. Determining the location of the source of radio mission by a group of unmanned aircraft using differential range information	39
A. Shegidevich, H. Zhukova, D. Shcherbunov, V. Kotovich. Anti-icing fluids in civil aviation	43
A. Shegidevich, V. Stepanenko, S. Yakhnevich. Concept of solar power plants for energy supply of unmanned aviation flights	49
E. Shaporova, A. Kapustin, S. Stoiko. Comprehensive assessment of the state of a gte based on tribodiagnostics	55

PEDAGOGICAL SCIENCES

V. Shalupin, I. Rodionova. Methods of planning training lessons in physical education with students of universities of civil aviation in a week training cycle	62
O. Petrovskaya, I. Razumnik, Yu. Tsybukova, A. Petrovskaya. Implementation of models of blended learning in the educational process for general professional disciplines	66

SCIENCES OF LAW

Z. Khalilov. Space policy of the republic of azerbaijan and its legal regulation	74
Z. Masharsky, A. Staranovich, S. Stoiko. International legal regime for irregular air services	80

Educational establishment
BELARUSIAN STATE ACADEMY OF AVIATION

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

Колонка
главного редактора



Шегидевич
Артём Артурович

Ректор
Белорусской
государственной
академии авиации

Уважаемые читатели, научно-практический журнал «Авиационный вестник» стал признанной площадкой для опубликования результатов диссертационных исследований магистрантов, аспирантов и других научных работников по таким научным направлениям технической отрасли, как эксплуатация воздушного транспорта; навигация и управление воздушным транспортом. Так, согласно приказу Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь 01.04.2014 № 94 (в редакции приказа Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь 16.02.2021 № 36) научно-практический журнал «Авиационный вестник» включен в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований.

Теперь наш журнал сможет еще эффективнее содействовать развитию авиационной науки, отражению основных тенденций, направлений и результатов научных исследований, аккумулировать статьи по профильной тематике, способствуя тем самым выполнению учреждением образования «Белорусская государственная академия авиации» роли ведущей научной, образовательной и исследовательской организации в области гражданской авиации Республике Беларусь.

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

Дело для настоящих мужчин



**Начальник Минского аэроклуба
ДОСААФ РБ им. дважды Героя
Советского Союза С.И. Грицевца
Мочанский Николай Петрович**

— У каждого человека есть дорогие сердцу родные места, его малая родина. Где ваша малая родина и что она для Вас значит?

— Я родился в деревне Беленок под Дрогичином, на Днепровско-Бугском канале. В среднюю школу ходил в деревню Белин. А мой отчий дом, в котором я люблю бывать, находится неподалёку, в деревне Малиновка, и построен после войны, где-то в 1946-47 годах. Я часто приезжаю туда, чтобы коснуться родных стен, зарядиться энергией родной земли. И, бывая на малой родине, всегда подвожу какой-то итог своим делам, поступкам. Здесь мои корни, здесь моя точка отсчёта.

Детство у меня было счастливое, и прошло в многодетной семье. Я был в семье самым младшим. Родители, братья, сестры — они все большой авторитет для меня. В нашей семье всегда много и дружно работали. Отец прививал нам любовь к труду, и любил подчеркнуть, что труд решает всё. Тот, кто трудится, тот имеет достаток, хорошо зарабатывает, обеспечивает себя и семью. А ещё отец ненавязчиво наставлял меня в христианской вере. И с тех пор эта составляющая нашей жизни для меня тоже важна — считаю своим небесным покровителем святителя Николая

Чудотворца.

— Выбирая профессию лётчика, вы брали пример с кого-то из родных и близких?

— Для моих родных, да и для всех земляков мой выбор профессии, конечно, был в диковинку. В нашем роду никогда не было лётчиков. Трудились трактористами, шоферами, работали в колхозе. Так что я открыл новую страницу в истории нашего рода. Правда, в школе, в классе пятом, в сочинении я писал, что хочу быть председателем колхоза. Потому что было сложно получить лошадь в колхозе для обработки земли, долго ждать своей очереди, вот мне и хотелось так по-детски искренне помочь родителям. А выбор профессии на всю жизнь, как это нередко бывает, предопределил случай. Брат служил в авиационном полку в Черняховске, работал там водителем, потом писарем в штабе, и, когда приехал в отпуск, привёз мне офицерскую фуражку. Один из лётчиков передал её мне с напутственными словами хорошо учить математику и физику, чтобы стать лётчиком. Брат сказал мне: «Коля, я познакомился с замечательными людьми — лётчиками, настоящими героями. Мне кажется, у них самая лучшая профессия». Эти слова надолго запали мне в душу. Потом я стал читать книги об авиации, и мой интерес к будущей профессии стал ясным и осознанным.

— Правда ли, что лётным навыкам вы обучились, скрывая это от начальства?

— Сначала я получил в Калининграде профессию авиационного техника, так как не прошёл медицинский отбор при поступлении в Ейское высшее авиационное училище летчиков — хирург забраковал по росту, не хватило 2 см до установленного минимального норматива. Иной бы сдался, но я решил, что обязательно добьюсь цели. И каждый последующий жизненный этап приближал меня к цели. Я не ждал, сложа руки, а

боролся за профессию лётчика. Придя в армию лейтенантом, служил техником по электронному оборудованию самолетов МиГ-21 и МиГ-23 в одном из истребительных авиаполков в Венгрии, и добился, чтобы мне разрешили совершать прыжки с парашютом. Вернувшись в родную Беларусь в 1980 году, служил в истребительном авиационном полку в Бобровичах, а потом в Минске, в политотделе 26-й Воздушной армии, и тогда действительно втайне от начальства записался в аэроклуб ДОСААФ, представившись водителем с Минского тракторного завода. Сначала продолжил занятия парашютным спортом, а затем уговорил начальника аэроклуба полковника Виктора Ковалева, чтобы он разрешил мне обучаться пилотированию вертолётов. А дальше четыре года в свободное от работы время, без отпусков и выходных занимался лётным делом. Было сложно совмещать графики работы и обучения так, чтобы не придавать огласке любимое занятие. Экономил каждую минуту. После работы я доехал трамваем до Зелёного Луга, и, когда шёл через лес на аэродром, то переодевался, меняя военную форму на повседневную одежду, которая хранилась в рюкзаке, подвешенном на сосне. Когда получил на аэродроме в Боровой удостоверение лётчика-спортсмена, пошел на прием к командующему с рапортом разрешить мне экстерном сдать экзамены в Сызранском училище летчиков. В штабе ВВС это вызвало настоящий шок: как, почему, кто позволил? Однако в конце концов профессиональные авиаторы оценили мое стремление летать. Экзамены я сдал, и путь в небо был открыт.

— В одном из интервью вы сказали: «Междур мной и небом никто встать не может».

— Да, и моя жена на это обижается. Но так оно и есть. Небо — это моя мечта, и я сделал всё возможное, чтобы мечту реализовать. Путь

в профессию оказался непростым, и потребовал настойчивости и целеустремлённости. От окончания средней школы и до назначения на летную должность прошло 13 лет 6 месяцев и 7 дней. Но в результате того, чего хотел, к чему стремился, я добился, моя мечта сбылась. У меня более 7500 часов налёта, то есть я почти год провёл в небе! Для меня нет плохой погоды, потому что я летаю и днем, и ночью, и в простых, и в сложных метеорологических условиях. И горжусь тем, что я — лётчик. Нет профессии лучше в мире, чем профессия лётчика! Ни один лётчик заявления по собственному желанию о снятии с должности не написал. Это дело всей жизни для тех, кто влюблён в небо.

— На каком воздушном судне вы больше любите летать?

— К настоящему времени я освоил восемь типов летательных аппаратов. Как лётчику мне очень сложно сказать, что я больше люблю или не люблю. У лётчиков есть такая поговорка: «Много летать не вредно, вредно не летать». Я всегда в теме или, как говорят профессионалы, «на крыле». Самое главное — чтобы был самолёт, и было разрешение на взлёт. Я летаю на самолете Як-52, и этот самолёт мне, как и многим, нравится своей надежностью. Часто поднимаю в воздух вертолеты Ми-8, Ми-2, Ми-24, американский вертолет Robinson R44.

— Что отличает профессию лётчика от других профессий?

— В литературе есть такой штамп, что лётчики летают, как птицы, наслаждаются красотой бескрайнего неба. Лирика — это хорошо, она тоже в нашей профессии есть. Но в небе, прежде всего лётчики пашут! Лётчик, прежде чем сесть в кабину, должен не на 99,9%, а на 100% знать, что он взлетит и приземлится, выполнив пассажирские перевозки, хозяйствственные работы или боевую задачу. Самолёт, вертолёт — это железо, металл и с ними надо на земле договориться, чтобы потом в воздухе спокойным быть. Но для того, чтобы договориться, надо всё знать. И профессионализм летчика заключается в том, чтобы не доводить ситуацию в небе до подвига. Однообразных или одинаковых полётов ни у одного лётчика не бывает. Каждый полёт имеет свои



Фото из личного архива Н.П. Мочанского

особенности, связанные с заданием, метеорологическими условиями, порой года, типом воздушного судна. Это постоянная концентрация внимания, полная мобилизация душевных и физических сил. Здесь от человеческого фактора многое зависит, даже от настроения. Но самое главное — лётчик должен осознавать, что на нём огромная ответственность за безопасность людей. И когда он это поймёт — он и учиться, и летать будет хорошо, и, что немаловажно, соблюдать предполётный режим.

— Что делать, если в небе вдруг случится нештатная ситуация?

— В критической ситуации надо действовать спокойно, хладнокровно, за секунду принять правильное решение и на него работать. Паника здесь не помощник. Только при хорошем знании техники и психологической устойчивости лётчик сможет справиться с аварийной ситуацией, спасти технику, себя, людей. Разные ситуации бывают. Конечно, в семье стараюсь об этих тонкостях не говорить, и оставляю проблемы на работе.

— Но в 2018 году вы попали в критическую ситуацию, которую нельзя было скрыть от семьи. Об этом происшествии говорили все средства массовой информации. О том, как благодаря высокому профессионализму вы вышли победителем, и были награждены Орденом «За личное мужество». Часто вспоминаете те события?

— Конечно, память никогда не

позволит мне о них забыть. Кажется, уже сотни раз прокрутил эти события мысленно, многократно рассказывал о них и в процессе обучения курсантов и на выступлениях в разных аудиториях, но каждый раз, когда к ним возвращаюсь, охватывает волнение. Хотя в тот миг, 6 мая 2018 года, когда при выполнении полета на вертолёте Ми-2 произошло возгорание, я был максимально собран, не волновался, быстро принял правильное решение и сделал всё необходимое, чтобы посадить вертолёт в безопасном для людей месте и потушить пожар. С момента возгорания до первого касания о землю прошло всего 45 секунд. То, что удалось сохранить вертолёт, позволило в последующем производителю учесть причину возгорания для доработки конструкции и, тем самым, исключить риск повторения таких аварийных ситуаций.

— Коллеги прозвали Вас «полковник Вихрь», имея ввиду вашу неиссякаемую энергию, инициативность, стремление не успокаиваться на достигнутом. Яркий пример этому — созданный благодаря вашим личным усилиям единственный на постсоветском пространстве музей авиационной техники. А какие экспонаты музея авиационной техники вам особенно дороги?

— Их уже около 50, и они все для меня родные. От первого самолёта, который встал в музее, до крайнего. Потому что все они прошли через моё сердце. Мы экс-



Минский аэроклуб ДОСААФ Республики Беларусь
имени дважды Героя Советского Союза С. И. Грицевца

позицию собирали по крупицам, и продолжаем собирать. Были переживания, бессонные ночи целями неделями. Придет время, и, возможно, будет написана книга о том, как создавался музей.

— Переезд в 2017 году на новое место базирования — аэродром Липки — стал важным шагом в развитии Минского аэроклуба ДОСААФ. Каковы в связи с этим ваши дальнейшие планы?

— Хочу подчеркнуть, что реализация идеи переезда аэроклуба с аэродрома Боровая потребовала большой системной работы, коллегиальных усилий, серьезных инвестиций. От зарождения замысла до его окончательного воплощения прошло 10 лет, но полученный результат того стоит. На аэродроме Липки создана отличная инфраструктура, которая используется для обучения курсантов авиационного факультета Военной академии Республики Беларусь и спортсменов. Техническое оснащение позволяет осуществлять заправку и хранение воздушных судов. Взлетно-посадочная полоса длиной 721 метр и шириной 40 метров с новым светосигнальным оборудованием позволяет выполнять полеты в любое время и практически в любую погоду. Следующий шаг в развитии, который уже обеспечен соответствующими решениями на государственном уровне и договоренностями — это подготовка совместно с Белорусской государственной академией авиации пилотов гражданской авиации. Все необходимые условия для этого имеются.

— Как отец, вы хотели, чтобы ваши сыновья пошли по вашим стопам и готовили их к профессии, связанной с авиацией?

— Мой отец всегда говорил мне: «Мужчина должен пахать!» Эти же слова я повторял своим сыновьям, приучая их к труду. Чтобы чего-то добиться, надо постоянно двигаться — учиться, трудиться, зарабатывать. Думаю, это мои сыновья хорошо усвоили. Я всегда говорил, что если у меня будет сын, то он должен пойти по моим стопам, если ему позволит здоровье. Не могу сказать, что я настаивал, ведь важно, чтобы выбор был осознанным. Конечно, я горжусь тем, что старший сын Алексей пошёл по моим стопам, окончил авиационный факультет Военной академии, был военнослужащим, а сейчас работает пилотом в авиакомпании «Белавиа» и активно занимается вертолетным спортом, входит в число лучших спортсменов мира. Средний сын Валерий выбрал профессию, не связанную с авиацией, окончил БНТУ, стал предпринимателем, но, занимаясь парашютным спортом, достиг уровня более двух тысяч парашютных прыжков. Младший сын Николай, в этом году окончил гимназию, и хочет связать свою жизнь с авиацией, имея уже за плечами 92 часа налёта на самолете ЯК-52, третий спортивный разряд, и опыт выполнения полётов на простой, сложный и высший пилотаж. Я доволен своими сыновьями.

— Ваш друг, российский телеведущий Леонид Якубович так охарактеризовал Вас: «В одном фильме была великая фраза на

все времена: «Есть такая профессия — Родину защищать». Николай Мочанский из этой категории. На таких, как он, держится земля. Он, конечно, мужик настоящий!» А что значит в вашем понимании быть настоящим мужиком?

— Это значит не бояться брать на себя ответственность за семью, за других людей, за свою Родину. Отвечать за свои слова. Трудиться до седьмого пота и только делами доказывать свою правоту. Именно это важно в профессии лётчика. Летать — это дело для настоящих мужчин. Но и для девчат, влюблённых в небо, эта дорога открыта.

— Ваш девиз по жизни?

— Мне нравятся слова знаменитого американского физика Лео Силарда. Он говорил, что для успеха не нужно быть умнее всех, нужно на один день быть быстрее большинства.

— Вы оптимист или пессимист?

— Отвечаю так: я воспринимаю жизнь очень позитивно, и трудности меня не пугают. Не вижу никакого смысла в том, чтобы жаловаться на жизнь, грузить других своими проблемами. Нет безвыходных ситуаций. Просто нужно прилагать усилия и не сидеть сложа руки.

— Вы счастливый человек?

— Я считаю, что я самый счастливый человек в мире! Потому, что я достиг того чего хотел. Потому что у меня замечательная семья, прекрасные родственники, шикарные друзья! То есть, если взять те составляющие, которые формируют нашу душу, успокаивают сердце и радуют, то они у меня есть. А ещё счастье в том, что свой профессиональный опыт и знания я могу передать молодым лётчикам.

— Спасибо, Николай Петрович за интервью.

Материал подготовлен на основе интервью проректором по воспитательной работе учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации» И.Г. Яцкевичем



ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 544.421.081.7

С.В. ВАСИЛЕВИЧ, М.В. МАЛЬКО, Е.А. ШАПОРОВА

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ ТОПЛИВА НА ПРИМЕРЕ АВИАЦИОННОГО КЕРОСИНА

Сергей Владимирович Василевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технической эксплуатации воздушных судов и двигателей учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
svasilevich@yandex.ru

Михаил Владимирович Малько – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник сектора «Биоэнергетика», государственного предприятия «Институт энергетики НАН Беларусь», Республика Беларусь
malko.mikhail@gmail.com

Елена Анатольевна Шапорова – кандидат химических наук, доцент кафедры технической эксплуатации воздушных судов и двигателей учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
elena.telushenko@gmail.com

Siarhei Vasilevich – Candidate of Technical Science, Associate Professor, Associate professor of the Department of Technical Operation of Aircraft and Engines of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
svasilevich@yandex.ru

Mikhail Malko – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher of the Bioenergy Sector of the State Enterprise Institute of Energy of the National Academy of Sciences of Belarus, Republic of Belarus
malko.mikhail@gmail.com

Alena Shaparava – Candidate of Chemical Sciences, Associate professor of the Department of Technical Operation of Aircraft and Engines of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
elena.telushenko@gmail.com

Аннотация: в работе на основе результатов экспериментальных исследований кинетики термического разложения авиакеросина марки РТ определена энергия активации реакции методом Коутса и Редферна и предложенным авторами интегральным методом. Показано, что интегральный метод позволяет получать достаточно точные значения энергии активации и предэкспоненциального параметра, а также обеспечивает сохранение кинетического триплета, т.е. позволяет получать корректное описание степени разложения в условиях термогравиметрических исследований.

Ключевые слова: энергия активации, метод Коутса и Редферна, интегральный метод, кинетика термического разложения, керосин РТ.

Abstract: in this work, based on the results of experimental studies of the kinetics of thermal decomposition of jet fuel of the RT brand, the activation energy of the reaction was determined by the Coates and Redfern method and the integral method proposed by the authors. It is shown that the integral method allows one to obtain sufficiently accurate values of the activation energy and the preexponential parameter, and also ensures the preservation of the kinetic triplet t , i.e. allows to obtain a correct description of the degree of decomposition under the conditions of thermogravimetric studies.

Keywords: activation energy, Coates and Redfern method, integral method, kinetics of thermal decomposition, RT kerosene.

Xимические реакции осуществляются в результате взаимных столкновений молекул. Важной характеристикой химических реакций веществ, в том числе топлив, является энергия активации. Величина энергии активации

зависит от химической природы топлива и физических условий, при которых происходит химическая реакция. Также энергия активации зависит от исходного состояния реагирующих веществ (топлива и окислителя), прежде

всего от температуры и давления.

Значение энергии активации определяется с использованием термогравиметрического метода при непрерывном нагреве исследуемого топлива с постоянной скоростью нагрева. Известно не-

сколько методов анализа разложения топлива в условиях нагрева с постоянной скоростью. Это методы Киссинджера, Акахиро и Санозе [1, 2], метод Фридмена [3], метод Флинна, Уолла и Озавы [4, 5], метод Коутса и Редферна [6] и метод Криадо [7].

Целью данной работы было определение энергии активации реакции термического разложения авиационного керосина РТ методом Коутса и Редферна, а также разработанным авторами интегральным методом.

Описание методики эксперимента

На рис. 1 представлен термогравиметрический прибор, на котором производилось исследование разложения горючего материала с определением макрокинетических характеристик процесса конверсии.

Установка используется для измерения температуры, теплоты процессов и величины потери веса образца при нагреве с постоянной скоростью при кристаллизации, испарении, полиморфных превращениях, плавлении, разложении, химических и других реакциях, связанных с поглощением или выделением тепла, а также для определения теплоты горения и температуры воспламенения.

В качестве исследуемого материала использовался авиационный керосин РТ. Авиационное топливо марки РТ предназначено для применения в турбовинтовых и турбореактивных двигателях различных видов летательных аппаратов. Представляет собой светлую прозрачную жидкость, состоящую в основном из парафиновых, нафтеновых, ароматических углеводородов.

Исследование проводилось следующим образом.

При изучении разложения авиационного керосина в кювете термогравиметрического прибора помещается навеска исследуемого вещества (примерно 500 мг). Затем устанавливается режим нагрева с постоянной скоростью (2 градуса в минуту) от температуры окружающей среды до 400 °C. В процессе нагрева непрерывно регистрируются значения



Рис. 1. Общий вид установки для дифференциально-термического анализа (ДТА) и термогравиметрического анализа (TGA) «Thermoscan-2» (USB, TGA модификация)

температуры и изменения массы образца через определенные промежутки времени (1,56 сек.). Термическое разложение осуществляется при атмосферном давлении при условии доступа воздуха.

Анализ экспериментальных данных гомогенного разложения авиационного керосина выполнялся на основе степени конверсии:

$$\alpha_t = \frac{(m_0 - m_t)}{m_0}$$

Здесь α_t — степень конверсии в момент времени t ;

m_0 — масса навески керосина в начальный момент времени, г;

m_t — масса навески керосина в момент времени t , г.

На рис. 2 представлено изменение степени конверсии авиационного керосина в гомоген-

ном процессе при непрерывном нагреве со скоростью 2 °K/мин. до 400 °C.

Как следует из рис. 2, заметное снижение массы керосина наблюдается уже при температуре порядка 350 К. Начиная с этой температуры степень разложения изменяется с ростом температуры. После достижения температуры порядка 500 К наблюдается существенное уменьшение скорости разложения авиационного керосина и достижение степени разложения значения 1.

Применение метода Коутса и Редферна

Исследование кинетики разложения керосина (включающее в себя определение энергии активации) выполнялось на основании предположения о том, что при пе-

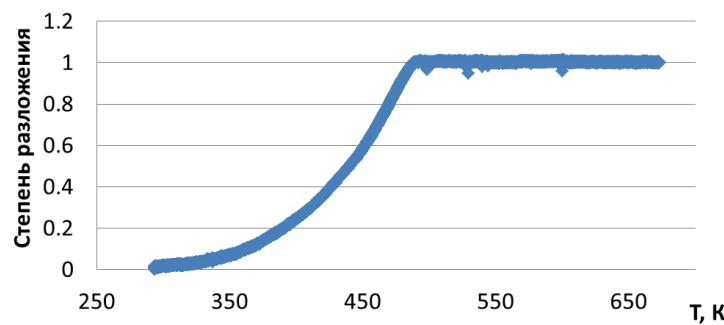


Рис. 2. Зависимость степени гомогенного разложения авиационного керосина от температуры

Таблица — Кинетические уравнения реакций термического разложения			
№	Модель	$f(\alpha)$	$g(\alpha)$
Модель зародышеобразования			
1	Степенной закон, P_1	1	α
2	Степенной закон, $P_{3/2}$	$(2/3)\alpha^{-1/2}$	$\alpha^{2/3}$
3	Степенной закон, P_2	$2\alpha^{1/2}$	$\alpha^{1/2}$
4	Степенной закон, P_3	$3\alpha^{2/3}$	$\alpha^{1/3}$
5	Степенной закон, P_4	$4\alpha^{3/4}$	$\alpha^{1/4}$
Модель сигмоидного уравнения реакции			
6	Аварами-Ерофеев, $A_{3/2}$	$(3/2)(1-\alpha)[-Ln(1-\alpha)]^{1/3}$	$[-Ln(1-\alpha)]^{2/3}$
7	Аварами-Ерофеев, A_2	$2(1-\alpha)[-Ln(1-\alpha)]^{1/2}$	$[-Ln(1-\alpha)]^{1/2}$
8	Аварами-Ерофеев, A_3	$3(1-\alpha)[-Ln(1-\alpha)]^{2/3}$	$[-Ln(1-\alpha)]^{1/3}$
9	Аварами-Ерофеев, A_4	$4(1-\alpha)[-Ln(1-\alpha)]^{3/4}$	$[-Ln(1-\alpha)]^{1/4}$
10	Проут-Томкин, A_u	$\alpha(1-\alpha)$	$Ln\left[\frac{\alpha}{(1-\alpha)}\right]$
Геометрическая модель изменения поверхности или объема			
11	Поверхность, R_2	$2(1-\alpha)^{1/2}$	$1-(1-\alpha)^{1/2}$
12	Объем, R_3	$3(1-\alpha)^{2/3}$	$1-(1-\alpha)^{1/3}$
Диффузионное лимитирование			
13	Одномерная диффузия, D_1	$1/2\alpha$	α^2
14	Двумерная диффузия, D_2	$[-Ln(1-\alpha)]^{-1}$	$(1-\alpha)Ln(1-\sigma) + \alpha$
15	Трехмерная диффузия, D_3	$\frac{(3/2)(1-\alpha)^{2/3}}{[1-(1-\alpha)^{1/3}]}$	$[1-(1-\alpha)^{1/3}]^2$
Лимитирование скоростью реакции			
16	Реакция 1-го порядка, F_1	$(3/2)(1-\alpha)^{1/3}$	$1-(1-\alpha)^{2/3}$
17	Реакция 2-го порядка, F_2	$4(1-\alpha)^{4/3}$	$1-(1-\alpha)^{1/4}$
18	Реакция 3-го порядка, F_3	$2(1-\alpha)^{4/2}$	$(1-\alpha)^{-1/2}-1$

рекорде от изотермического режима к условиям непрерывного нагревания сохраняется кинетический триплет, в который входят энергия активации, частотный фактор аррениусовского уравнения и механизм реакции.

Данное предположение позволяет определить кинетическое уравнение реакции для условия непрерывного изменения температуры в виде:

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T)f(\alpha) \quad (1)$$

Здесь $k(T)$ — константа скорости реакции, а $f(\alpha)$ функция, определяемая механизмом реакции.

Интегрирование уравнения (1) дает уравнение скорости реакции, выраженное в интегральном виде:

$$g(\alpha) = kt \quad (2)$$

где $g(\alpha)$ — интегральная функция кинетического уравнения.

В таблице представлены функции $f(\alpha)$ и $g(\alpha)$, соответствующие механизмам химических реакций разложения различных типов твердого тела [8–10].

Зависимость константы скорости $k(T)$ определяется аррениусовским выражением:

$$k(T) = AExp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (3)$$

где A — предэкспоненциальный фактор, а E — энергия активации. Обе эти величины не зависят от температуры.

Уравнение (1) для условий нагрева изучаемого образца с постоянной скоростью нагрева β имеет вид:

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{A}{\beta} exp\left(-\frac{E}{RT}\right) f(\alpha) \quad (4)$$

Интегрирование уравнения (4) по температуре приводит к выражению:

$$g(\alpha) = \frac{A}{\beta} \int_0^T exp\left(-\frac{E}{RT}\right) dT \quad (5)$$

Замена отношения $\frac{E}{RT}$ на x и последующая замена пределов интегрирования в уравнении (5) даёт уравнение:

$$g(\alpha) = \frac{AE}{\beta RT} \int_x^\infty \frac{exp(-x)}{x^2} dx \quad (6)$$

Интеграл в выражении (6) не имеет аналитического решения. В разное время различными специалистами были предложены приближенные решения этого интеграла. Одним из наиболее популярных приближений является приближение Коутса и Редферна. Эти авторы получили на основании асимптотических решений следующее приближенное уравнение, позволяющее оценить энергию и предэкспоненциальный фактор аррениусовского уравнения:

$$\begin{aligned} \ln\left(\frac{g(\alpha)}{T^2}\right) &= \\ &= \ln\left[\frac{AR}{\beta E}\left(1 - \frac{2RT(m)}{E}\right)\right] - \frac{E}{RT} \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь $T(m)$ — средняя температура химического процесса, определяемая соотношением:

$$T_m = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i T_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} \quad (8)$$

где α_i — экспериментальное значение степени разложения изучаемого вещества при температуре T_i . Анализ выражения (7) показывает, что первый член в правой части этого выражения является постоянной величиной, не зависящей от

температуры. Обозначим тот член буквой С:

$$\ln \left[\frac{AR}{\beta E} \left(1 - \frac{2RT(m)}{E} \right) \right] = C \quad (9)$$

Преобразовав (9) и (7), получим выражение:

$$\ln \left(\frac{g(\alpha)}{T^2} \right) = C - \frac{E}{RT}. \quad (10)$$

Данное уравнение является классическим выражением уравнения Аррениуса:

$$\ln(k) = C - \frac{E}{RT}. \quad (11)$$

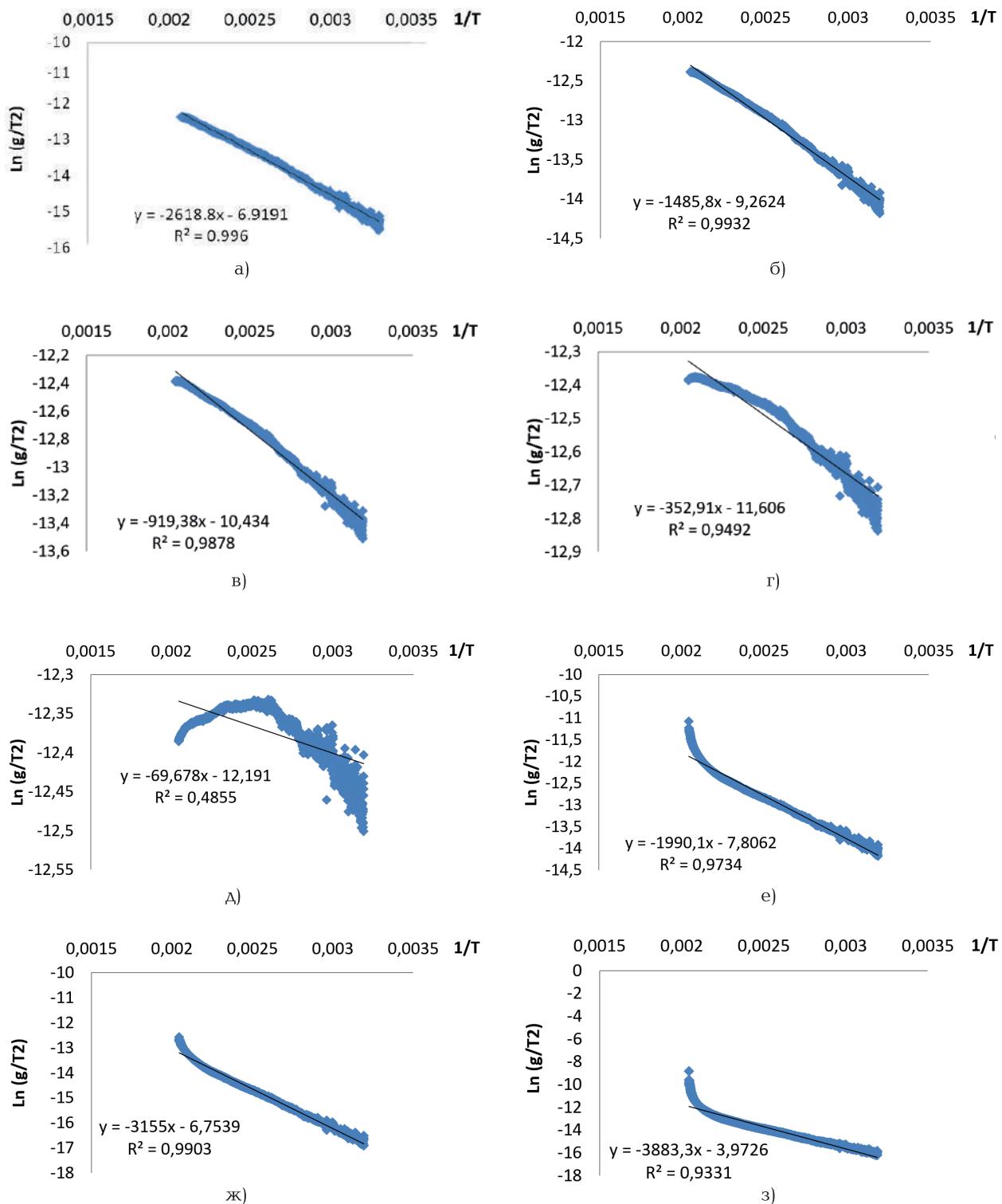


Рис. 3. Зависимость Коутса-Редферна для моделей P_1 (a), $P_{3/2}$ (б), P_2 (в), P_3 (г), P_4 (д), $A_{3/4}$ (е), F_2 (ж), F_3 (з)

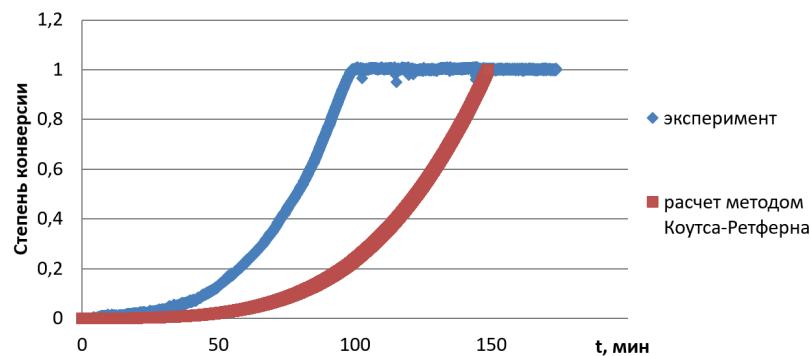


Рис. 4. Сравнение экспериментальных степеней разложения авиационного керосина и степеней разложения, рассчитанных на основе метода Коутса и Редферна

которое позволяет на основании зависимости логарифма константы скорости k от обратной температуры определить энергию активации и частотный фактор константы скорости.

Метод Коутса и Редферна по сути дела является методом подгонки, так как для получения адекватного кинетического триплета при его использовании приходится перебирать многие известные механизмы с целью выбора такого механизма, который приводит к линейности функции $\ln\left(\frac{g(\alpha)}{T^2}\right)$ от обратной температуры. Такая линейная зависимость возможно только в случае коэффициента детерминации $R^2 = 0,996$.

закона P_i . Оно имеет вид:

$$g(\alpha) = \alpha = kt \quad (12)$$

Использование данного уравнения приводит к максимальному значению коэффициента детерминации $R^2 = 0,996$.

Представленное на рис. 3, а аппроксимационное уравнение

$$y = 2618,8x - 6,9191 \quad (13)$$

позволяет определить энергию активации и предэкспоненциальный фактор константы скорости реакции третьего порядка гомогенного разложения пиролизной смолы.

В выражении (13) переменная x определяется по соотношению:

$$x = 1/T \quad (14)$$

Умножение постоянного коэффициента первого члена правой части выражения (14) на газовую постоянную $R = 8,314 \text{ Дж/(моль·град)}$ дает значение энергии активации реакции первого порядка, равное примерно $21772,7 \text{ Дж/моль}$.

Сравнение выражений (10) и (13) позволяет получить значение предэкспоненциального фактора А реакции первого порядка равному $0,008107 \text{ сек}^{-1}$.

С учетом вычисленных значений энергии активации и предэкспоненциального фактора, аррениусовское уравнение для расчета константы скорости первого порядка гомогенного разложения авиационного керосина запишется в виде:

$$k = 0,008107 \cdot \text{Exp}(-21772,7/RT) \quad (15)$$

Корректность выражения (15), установленного на основе метода Коутса и Редферна, была проверена в настоящей работе на примере расчета с использованием выражений (12) и (15) степени гомогенного разложения авиационного керосина, осуществленного при скорости нагрева 2 К/мин .

Сравнение значений степени разложения пиролизной смолы, рассчитанных с использованием выражений (12) и (15) с экспериментальными, представлено на рис. 4.

Как показывают данные, приведенные на рис. 4, расчетные значения степени разложения, установленные при использовании выражения (12), в 4–5 раз ниже экспериментальных величин. Это означает, что, по крайней мере, в случае разложения авиационного керосина применение метода Коутса и Редферна приводит к явно ошибочным результатам, что указывает на необходимость использования других методов определения констант скоростей реакции.

Применение интегрального метода

В процессе исследования термической конверсии авиационного керосина был также использован разработанный авторами метод анализа данных, устанавливаемых в гравиметрических исследованиях. Этот метод можно обозначить как интегральный метод ввиду того, что значения константы скорости реакции определяются напрямую из экспериментальных значений степени разложения. Данный метод основывается на использовании метода Коутса и Редферна для установления механизма реакции и интегрального уравнения кинетики для расчета значений константы скорости. Сущность этого метода заключается в следующем.

Уравнение (2) можно представить в виде:

$$k = \frac{g_i^*(\alpha)}{t_i^*} \quad (16)$$

Здесь $g_i^*(\alpha)$ значение $g(\alpha)$, рассчитанное по экспериментальному значению степени разложения при времени реакции t_i^* для механиз-

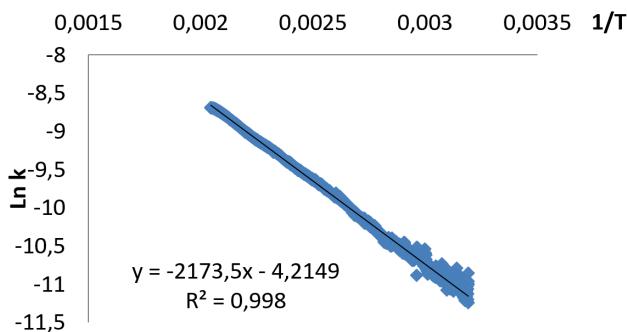


Рис. 5. Зависимость константы скорости реакции первого порядка, определенной интегральным методом, от обратной величины температуры

ма, который приводит к линейной зависимости $\ln\left(\frac{g(\alpha)}{T^2}\right)$ от обратной температуры, а значение t_i^* , определяется по соотношению:

$$t_i^* = t_i - t_{ind} \quad (17)$$

В выражении (17) величина t_{ind} – это длительность индукционного периода, т.е. длительность промежутка времени от начала нагрева вещества до момента начального разложения вещества.

В качестве приближенного значения индукционного периода можно взять время, начиная с которого имеется стабильное повышение степени разложения.

Было определено, что в случае авиационного керосина длительность индукционного периода близка к нулю и ей можно пренебречь.

Интегральное выражение кинетического уравнения $g(\alpha)$ соответствующее выбранному механизму, разрешается относительно степени разложения в виде некоторого соотношения.

$$\alpha_i^{cal} = f(k_i^*, t_i^*, t_{ind}) \quad (18)$$

Сравнение метода Коутса и Редферна и метода, предложенного авторами (соотношения 16 – 18) представлено далее.

На рис. 5 представлена зависимость логарифма константы скорости гомогенного разложения пиролизной смолы, установленной при использовании интегрального метода.

Параметры, установленные в результате аппроксимации методом наименьших квадратов значений константы скорости, рас-

считанных при использовании интегрального метода, позволяют определить следующее аррениусовское уравнение:

$$k = 0,014774 \cdot \text{Exp}(-18070,48 \cdot RT) \quad (19)$$

На рис. 6 представлены для сравнения значения степени разложения авиационного керосина, рассчитанные с использованием зависимостей (12) и (19), а также экспериментальные значения степени разложения, установленные в термогравиметрических исследованиях при скорости нагрева 2 К/мин.

Как следует из данных на рис. 6, зависимость (19) позволяет корректно рассчитать константу скорости разложения авиационного керосина, а значит, и степени конверсии, которые в области значений вплоть до 1 практически не отличаются от экспериментальных величин.

Описанные исследования были проведены и для других скоростей нагрева (1 К/мин., 5 К/мин.,

10 К/мин.). Результаты показали, что выбранное выше кинетическое уравнение реакций термического разложения достаточно хорошо описывает процесс термического разложения авиационного керосина при всех указанных скоростях нагрева.

Ранее интегральный метод был апробирован на других веществах, таких как карбонат кальция, доломит, а также жидкие углеводороды, полученные в ходе пиролиза растительной биомассы [11]. Полученные результаты, как и в случае авиационного керосина, показали, что применение интегрального метода дает возможность определить энергию активации и константу скорости термической деструкции с большей точностью, чем при использовании метода Коутса и Редферна. Это позволяет заключить, что интегральный метод, описанный в настоящей работе, приводит в отличие от метода Коутса и Редферна к корректным значениям энергии активации и предэкспоненциального фактора реакции.

Заключение

Приведенные выше результаты исследования свидетельствуют о том, что интегральный метод анализа термогравиметрических исследований, основанный на использовании метода Коутса и Редферна для определения механизма реакции и интегрального уравнения реакции для определения константы скорости, позволяет корректно описать экспериментальные значения степени разложения исследуемого вещества.

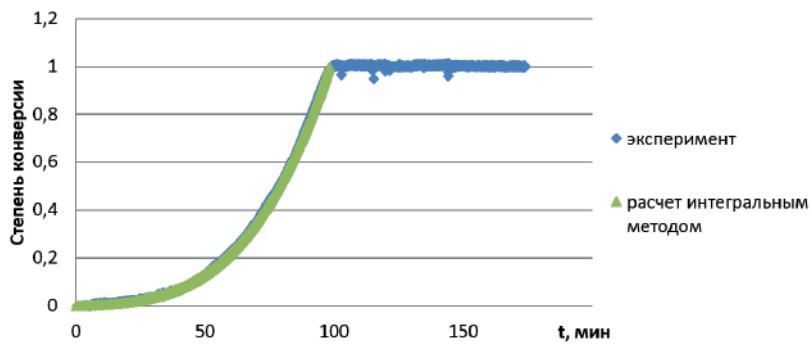


Рис. 6. Сравнение экспериментальных степеней разложения авиационного керосина и степеней разложения, рассчитанных на основе метода Коутса и Редферна

Это позволяет рекомендовать интегральный метод, разработанный авторами, в качестве метода анализа термогравиметрических данных. Использование же традиционного метода Коутса и Редферна приводит к явному завышению энергии активации и значения предэкспоненциального фактора. Так, сравнение зависимостей (15) и (19) показывает, что энергия активации реакции первого порядка, установленная на основе традиционного метода Коутса и Редферна, на 3,7 кДж/моль превышает энергию активации, определенную при использовании интегрального метода. Различие в значениях предэкспоненциального фактора при этом также довольно существенно.

Завышенные значения энергии активации и предэкспоненциального фактора в случае применения Коутса и Редферна приводят к явно ошибочным значениям степени разложения, что указывает на несохранение кинетического триплета. И, наоборот, корректное описание степени разложения в условиях термогравиметрических исследований с использованием интегрального метода свидетельствует о том, что интегральный метод обеспечивает сохранение кинетического триплета. А это означает, что зависимость (19) может также использоваться для описания разложения вещества в изотермических условиях.

Статья подготовлена в рамках выполнения научно-исследовательской работы Белорусского фонда фундаментальных исследований (договор с БРФФИ № Т19У-001 от 02.05.2019 г.).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Kissinger, H. E. Reaction kinetics in differential thermal analysis / H.E. Kissinger // Anal. Chem. – 1957. – Vol. 29, No. 11. – P. 1702-1706.
2. Akahira, T. Joint Convention of Four Electrical Institutes / T. Akahira, T.T. Sunose // Report of Research, Chiba Institute of Technology. – 1971. – Vol. 16. – P. 22-31.
3. Friedman, H. Kinetics of thermal degradation of char-forming plastics from thermogravimetry. Application to a phenolic plastic / H. Friedman // J. Polym. Sci., Part C. – 1964. – Vol. 6. – P. 183-195.
4. Flynn, J. H. A quick, direct method for determination of activation energy from thermogravimetric data / J. H. Flynn, L. A. Wall // Polym. Lett. – 1966. – Vol. 4. – P. 323-328.
5. Ozava, T. A new method of analyzing thermogravimetric data / T. Ozava // Bull. Chem. Soc. Jpn. – 1965. – Vol. 38, No. 11. – P. 1881-1886.
6. Coats, A. W. Kinetics parameters from thermogravimetric data / A. W. Coats, J. P. Redfern // Nature. – 1964. – Vol. 201. – P. 68-69.
7. Criado, J.V. Kinetic analysis of DTA data from master curves / J.V. Criado // Thermochim. Acta. – 1978. – Vol. 24, No. 1. – P. 186-189.
8. Vyazovkin, S. Model-free and model-fitting approaches to kinetic analysis of isothermal and nonisothermal data / S. Vyazovkin, C. A. Wight // Thermochim. Acta. – 1999. – Vol. 340/341. – P. 53-68.
9. Han, Yu. Theoretical Study of Thermal Analysis Kinetics / Yu Han. – Lexington., Kentuki, 2014. – 35 p.
10. Ebrahimi-Kahrizsangi, R. Evaluation of reliability of Coats-Redfern method for kinetic analysis of non-isothermal TGA / R. Ebrahimi-Kahrizsangi, M. H. Abbasi // Trans. Nonferrous Met. Soc. China. – 2008. – Vol. 18. – P. 217-221.
11. Новый метод анализа термогравиметрических данных / М. В. Малько [и др.] // Известия ВУЗов. Химия и химические технологии. – 2021. – Т. 64, Вып. 3. – С. 24-32.

REFERENCES

1. Kissinger H.E. Reaction kinetics in differential thermal analysis // Anal. Chem. 1957. Vol. 29. No. 11, p. 1702-1706.
2. Akahira T., Sunose T. Trans. Joint Convention of Four Electrical Institutes, Paper No. 246, 1969 Research Report //Chiba Institute of Technology Sci. Technol. 1971. Vol. 16, p. 22-31.
3. Friedman H. Kinetics of thermal degradation of char-forming plastics from thermogravimetry. Application to a phenolic plastic // J. Polym. Sci., Part C. 1964. Vol. 6, p. 183-195.
4. Flynn J.H., Wall L.A. A quick, direct method for determination of activation energy from thermogravimetric data//Polym. Lett. 1966. Vol. 4. P. 323-328.
5. Ozava T. A new method of analyzing thermogravimetric data//Bull. Chem. Soc. Jpn. 1965. Vol. 38, No. 11, P. 186-189.
6. Coats A. W., Redfern J. P. Kinetics parameters from thermogravimetric data//Nature. 1964. Vol. 201. P. 68-69.
7. Criado J.V. Kinetic analysis of DTA data from master curves//Thermochim. Acta. 1978. Vol. 24, No. 1. P. 186-189.
8. Vyazovkin S., Wight C.A. Model-free and model-fitting approaches to kinetic analysis of isothermal and nonisothermal data.//Thermochim. Acta. 1999, P. 53-68.
9. Han Yu. Theoretical Study of Thermal Analysis Kinetics/ Thesis. 2014. Lexington. Kentuki. USA.
10. Ebrahimi-Kahrizsangi R., Abbasi M.H. Evaluation of realiblity of Coats-Redfern method for kinetic analysis of non-isothermal TGA/ Trans. Nonferrous Met. Soc. China. 2008. Vol. 18, p. 217-221.
11. Mal'ko M.V., Vasilevich S.V., Mitrofanov A.V., Mizonov V.E. An innovate method of thermogravimetric data analysis. Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Tekhnol. [ChemChemTech]. 2021. V. 64. N 3. P. 24 – 32.

Статья поступила в редакцию
19.03.2021

THE INFLUENCE OF CONSTRUCTION COMPONENTS OF AIRCRAFT NON-CONTACT DC GENERATORS ON THE QUALITY OF ELECTRIC ENERGY

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

Ольга Сергеевна Полетаева – старший преподаватель кафедры языковой подготовки учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
volhapaletayeva@gmail.com

Ксения Валерьевна Терещенко – курсант учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
kokovita13@gmail.com

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

Volha Poletayeva – Senior Teacher of Language Training Division of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
volhapaletayeva@gmail.com

Ksenia Tereshchenko – cadet of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
kokovita13@gmail.com

Аннотация: в работе рассматривается влияние трансформаторных ЭДС, демпферных контуров, процессов длящейся коммутации вентилей, а также неучет насыщения магнитной системы генератора на результаты исследований статических и динамических характеристик генератора при изменении режимов его работы при действии возмущений по цепям управления и нагрузки.

Ключевые слова: статические и динамические характеристики, бесконтактный генератор, демпферные контуры, трансформаторные ЭДС, коммутация вентилей.

Abstract: the paper considers the influence of transformer electromotive force, damping contours, processes of continuous switching of valves, as well as neglect of saturation of the generator magnetic system on the results of studies of static and dynamic characteristics of the generator when changing its operating modes (change of load and excitation currents).

Keywords: static and dynamic characteristics, non-contact generator, damper contours, transformer electromotive force, switching of valves.

In connection with the development of promising DC aviation power supply systems with non-contact (valve) generators (VG), developed according to the All electric aircraft concept, there is a need for a detailed study and analysis of steady-state and transient operating modes, both of the generators themselves and of systems in the whole.

In general, an aircraft valve generator is a combination of a salient-pole synchronous machine and a power rectifier unit [1, 2]. Therefore, the nature of the electromagnetic processes of valve generators depends on their design features, operating modes of the generator and rectifier unit, the action of disturbances along the load and control circuits.

With regard to aviation valve generators, many issues (taking into account the continuous switching of valves, the effect of damper contours and transformer electromotive force on transient processes, the features of optimal voltage regulation using digital devices, etc.) have not been studied in details [1 – 3]. This is due to the known complexity of the mathematical description

and modeling of electromagnetic processes of synchronous generators and rectifier unit valves. All this creates certain difficulties in the development and research of promising aircraft generators [2, 3].

Usually, in the study of contactless direct current electric machines, a varying degree of detail in the description of the electromagnetic processes of the generator is allowed. This is mainly carried out by neglecting the influence of transformer electromotive force, damping contours, processes of continuous switching of valves and neglect of saturation of the generator magnetic system. According to [2–4], the neglect of these factors does not have a significant effect on the results of studies of the static and dynamic characteristics of the generator when changing its operating modes. However, these statements relate to industrial synchronous generators and their distribution for aircraft DC valve electric machines requires additional clarification and research. In this work, studies on the influence of transformer electromotive force, damping contours and processes of continuous switching of valves of a power rectifier unit on the dynamic and static characteristics of a DC valve electric machine were carried out on the developed mathematical model of an aviation valve generator with a power of 12.

This generator is a combination of a salient-pole synchronous machine with an asymmetrical 6-phase stator winding (the angle of shift of the same phases of the windings relative to each other is 30 electrical degrees) and a power rectifier unit consisting of two 3-phase full-wave bridge circuits (Larionov's circuits), operating in parallel for the total load [2, 3].

For research, the mathematical model of a non-contact DC generator is written in the orthogonal axes d, q [3–5]. In this case, the electromagnetic processes of a salient-pole synchronous machine

with asymmetrical stator windings are represented by the following equations:

$$|u_{n(d,q)}| = R_c |i_{n(d,q)}| + p\omega |\Psi_{nd}| + \frac{d}{dt} |\Psi_{n(d,q)}|; \quad (1)$$

$$|u_R| = R_R |i_R| + \frac{d}{dt} |\Psi_R|; \quad (2)$$

$$u_{EE} = \left(T_{EE} \frac{di_{EE}}{dt} + i_{EE} \right) k_{EE}^{-1}; \quad (3)$$

$$\Psi_{nd} = L_{csn} i_{nd} + \Psi_S; \quad (4)$$

$$\Psi_{nq} = L_{aq} \left(\frac{2}{3k_Q} i_Q - i_{nq} \right) - L_q \cdot i_{nq}; \quad (5)$$

$$\Psi_f = L_{fs} \cdot i_f + \Psi_S k_f^{-1}; \quad (6)$$

$$\Psi_D = L_{Ds} \cdot i_D + \Psi_S k_D^{-1}; \quad (7)$$

$$\Psi_Q = L_{Qs} i_Q + L_{aq} \left(\frac{2}{3k_Q} i_Q - i_{nq} \right) k_D^{-1}; \quad (8)$$

$$\Psi_S = F \left[L_{aq} \left(\frac{2}{3k_f} i_f + \frac{2}{3k_D} i_D - i_{nd} \right) \right]; \quad (9)$$

where $n = 1, 2$ is an index indicating that the parameters of the synchronous generator belong to the first or second three-phase stator windings;

ω – rotational speed of the valve generator rotor;

p – is the number of pole pairs of a synchronous generator;

$|u_{n(d,q)}| = |u_{1d} u_{1q} u_{2d} u_{2q}|^T, |i_{n(d,q)}| = |i_{1d} i_{1q} i_{2d} i_{2q}|^T, |u_R| = |u_f u_D u_Q|^T, |i_R| = |i_f i_D i_Q|^T,$

$|\Psi_{n(d,q)}| = |\Psi_{1d} \Psi_{1q} \Psi_{2d} \Psi_{2q}|^T$ – matrices of voltages, currents and flux linkages;

d, q, D, Q, f – indices, meaning longitudinal and transverse stator windings, damper windings and excitation winding of a synchronous generator, respectively;

k_f, k_D, k_Q, k_{EE} – reduction factors of the corresponding windings [3, 4, 5];

$L_{csn}, L_{fs}, L_{Ds}, L_{Qs}$ – inductance of dissipation of stator windings, excitation, damper circuits, respectively;

R_c – active resistances of the stator windings of the synchronous generator;

u_{EE} – excitation voltage of the exciter of the synchronous generator;

Ψ_S – a function that takes into account the saturation of the generator magnetic system.

The nonlinear saturation function (9) is approximated by the idle characteristic of a synchronous generator

$$E = -\frac{1}{\sqrt{2}} \Psi_S \omega, \quad (10)$$

Table – Values of the parameters of the idle run characteristic of the generator

E, B	0	84	100	115	125	135	140	143	150	155	158	161	164	169	176
arg, A	0	5,5	6,8	8,4	10	12,3	13,7	15,4	17,7	21	24	28	36	45	60

and taking into account (9) will be written as follows

$$E = E \left[k_1 \left(i_f - \frac{3}{2} k_{fd} i_d \right) \right] = E(\arg) \quad (11)$$

where

$k_{fd} = \frac{2L_{ad}}{3L_{fd}}$ — reduction factor of the armature current scale i_f ;

$k_1 = \frac{\omega L_{fd}}{\sqrt{2}}$ — constant scale factor that can be omitted [4, 5];

$\arg = i_f - \frac{3}{2} k_{fd} i_d$ — argument of function.

The nonlinear characteristic E (\arg) was specified in the form of *Table*, followed by the use of a standard procedure for sampling from tables with linear interpolation, which is implemented in simulation modeling.

The mathematical description of the electromagnetic processes of the power rectifier unit is carried out with respect to the main harmonic phase currents and voltages of the synchronous generator, taking into account the effect on the value of the output voltage of the valve generator of higher harmonics in its composition, as well as the value of the angle that determines the shift between the main harmonic phase currents and voltages of the stator windings of an electric machine.

The value of the average rectified voltage of the valve generator U_{VG} , taking into account the processes of continuous switching of the valves of the power rectifier unit, is determined by the dependence:

$$U_{VG} = \frac{24}{\pi} \left[0,5 \left(\cos \frac{\pi}{4} - \cos \frac{5\pi}{12} \right) \right] U_m - U_{av,\gamma} \quad (12)$$

where

U_m — is the amplitude value of the fundamental harmonic of the line voltage of the synchronous generator;

$U_{av,\gamma}$ — switching voltage drop of valves:

$$U_{av,\gamma} = \begin{cases} 0,85(1-\cos\gamma_{k_1})U_m, \gamma_{k_1} \leq \frac{\pi}{12}; \\ 0,23U_m \left\{ 0,04 + 3,43 \sin \gamma_{k_2} + \cos \left(\gamma_{k_1} - \gamma_{k_2} - \frac{\pi}{12} \right) - \cos \left(\frac{\pi}{12} - \gamma_{k_2} \right) \right\}, \\ \text{при } \gamma_{k_2} > \frac{\pi}{12} \end{cases} \quad (13)$$

Here γ_{k_i} — are the angles of switching valves of Larionov's circuits, depending on the operating mode of the generator; $i = 1,2$ — indices denoting the first or second Larionov's circuit in the power rectifier unit of the generator. Moreover

$$\gamma_{k1} = 0,95 \arccos[(U_m - 4,46L_{cs}I_{load})U_m^{-1}]; \quad (14)$$

$$\gamma_{k2} = 0,95 \arccos[(0,99U_m - 1,15L_{cs}I_{\gamma})U_m^{-1}]. \quad (15)$$

where I_{load} — generator load current; $i = 1,2$.

The values of the phase currents in the switching interval of the valves of Larionov's circuits for various operating modes of the generator are written in the following form:

$$I_{\gamma 1} = I_{load} - 0,0076U_m L_{cs}^{-1}; \quad (16)$$

$$I_{\gamma 2} = 0,056U_m(1,22 - \cos\gamma_{k2})L_{cs}^{-1}. \quad (17)$$

Equations of connection between the instantaneous values of the variables in the d, q axes and the amplitude values of the same variables are represented by the expressions:

$$i_{nd} = I_m \cos(\delta_{1,2} - \phi_{1,2}); \quad (18)$$

$$i_{nq} = I_m \sin(\delta_{1,2} - \phi_{1,2}); \quad (19)$$

$$U_m = \sqrt{u_{nd}^2 + u_{nq}^2} \quad (20)$$

$$I_m = \sqrt{i_{nd}^2 + i_{nq}^2} \quad (21)$$

where $\delta_{1,2} = \arctg(u_{nq} u_{nd}^{-1})$ — the angle between the longitudinal axis and the voltage vector of the valve generator; $\phi_{1,2} = \arccos[\cos^2(0,5 \gamma_k)]$ — the angle between the vectors of the phase currents and voltages of the corresponding stator windings of the synchronous generator.

Now the generator load equation Z on the DC side will be written as

$$Z = L_{load} U_{VG} \psi_S^{-1}, \quad (22)$$

where L_{load} — load inductance.

The developed mathematical model of the valve generator (1) — (22) made it possible to carry out simulation modeling on the influence of transformer electromotive force, damper contours and processes of continuous switching of the valves of the power rectifier unit on the dynamic and static characteristics of the valve generator when disturbances along the load circuits (and signals along the control circuit). The assessment of the influence of the aforementioned factors on the characteristics of the valve generator was carried out by comparing the graphs of static and transient processes of the valve generator (field tests) and similar data obtained by simulation for the full mathematical model and lower-level models.

Some results of experiments on the study and analysis of the static and dynamic characteristics of an aircraft valve generator with a power of 12 kW when changing its operating modes are given below (Figures 1). Simulation modeling was carried out in the Matlab environment with load switching from 0 to 160 % of the rated power of the generator and changing the rotational speed of the valve machine shaft in the range from 4000 to 8000 rpm. In the figures, the solid line shows the results of a full-scale experiment.

Analysis of the experiment results (Figures 1) shows that taking into account the damper contours along both axes in the equations of the mathematical model of the valve generator has an insignificant effect on the course of transient electromagnetic processes only on

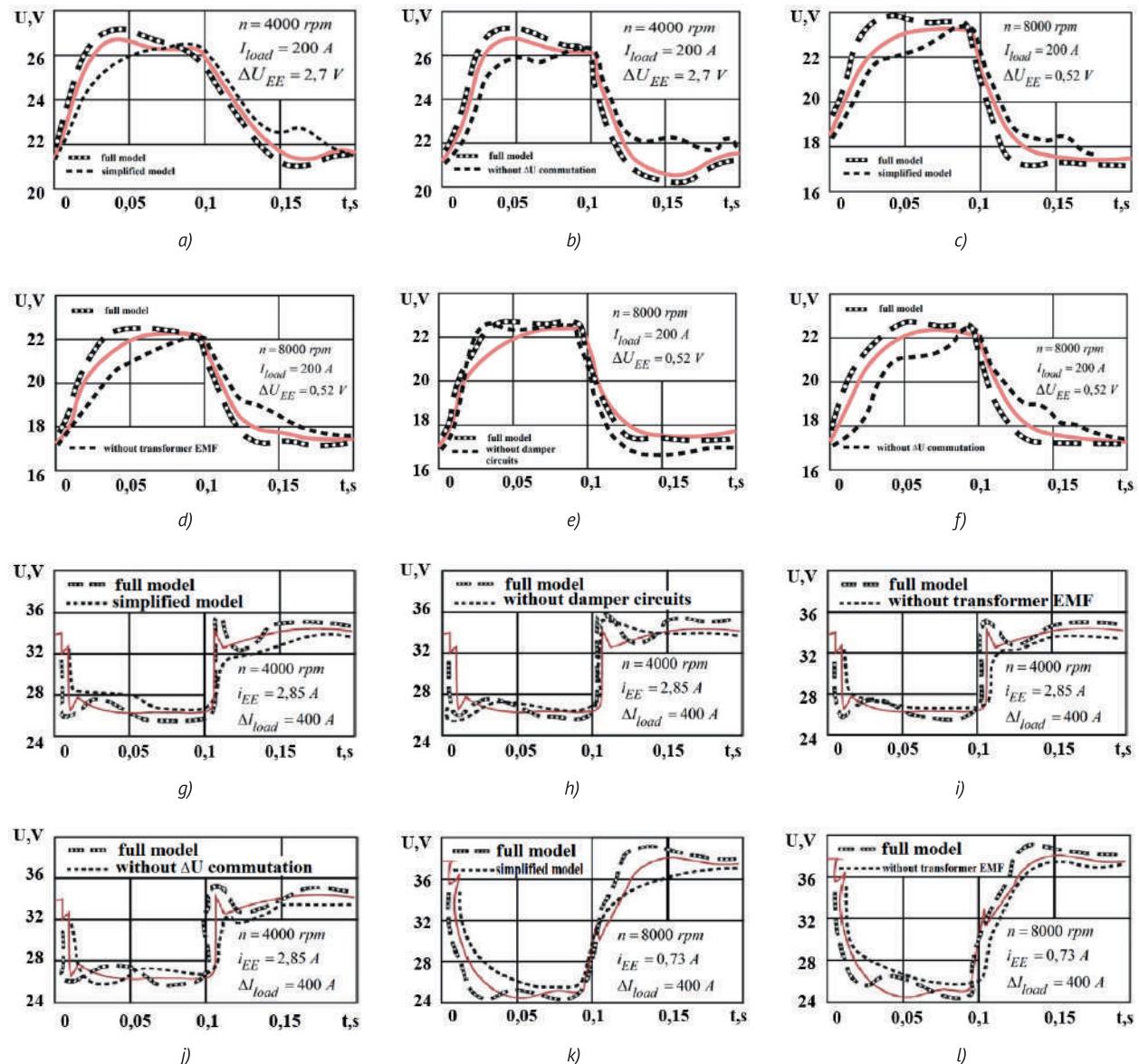


Fig. 1 Full and simplified model:

- a) 4000 rpm; b) without ΔU commutation (4000 rpm); c) (8000 rpm; d) without transformer EMF (8000 rpm);
e) without damper circuits (8000 rpm); f) without ΔU commutation (8000 rpm); g) 4000 rpm; h) without damper circuits (4000 rpm);
i) without transformer EMF (4000 rpm); j) without ΔU commutation (4000 rpm); k) 8000 rpm; l) without transformer EMF (8000 rpm)

a time interval close to the moment of change of control signals and load currents. At the same time, the values of the voltage overshoot of the valve generator are reduced by approximately (1.3–2.0)% in comparison with the full-scale experiment.

The analysis of the curves of change in the output voltage of the valve generator during simulation with and without taking into account the influence of transformer electromotive force, in the mathematical model of the generator shows (Figures 1) that qualitatively

the processes proceed similarly.

However, when taking into account the transformer electromotive force, there are large voltage deviations under the action of disturbances (switching of load currents) and a change in the control signal: the values of the generator voltage deviations are increased by (6–12)% in comparison with the full-scale experiment. When neglecting the influence of transformer electromotive force, the values of the generator voltage deviations at the moments of disturbances and changes in control actions are

underestimated by (8–14)% in comparison with the experimental curves. In addition, if the transformer electromotive force is not taken into account, the transient time increases by (15–30)%, depending on the magnitude of the load switching and the generator rotor speed.

Analysis of the generator voltage change curves with and without taking into account the processes of continuous switching of the valves of the power rectifier unit revealed (Figures 1) that neglecting the influence of the valve switching processes leads to a significant

decrease in voltage (up to 8–17%) compared to the data of a full-scale experiment at switching loads and changing control signals.

In addition, neglect of valve switching processes leads to a slight increase in the time of transient processes by (6–12)%, as well as to an increase in the voltage level of the valve generator in static modes (approximately from 3 to 7 %) in comparison with experimental data.

Thus, the conducted studies on the influence of saturation of the generator magnetic system,

transformer electromotive force, damping contours and processes of continuous switching of the rectifier unit valves on the characteristics of the mathematical model of the valve generator allow us to conclude that:

- *when studying transient modes of a valve generator, it is permissible to neglect the effect of damper contours;*
- *it is advisable to calculate the transient processes of the valve generator taking into account the influence of both transformer*

electromotive force and the processes of continuous switching of the valves of the power rectifier unit, because, data otherwise, when the operating modes of the generator change, the voltage overshoot will be increased by (5–18) %, and the time of the transient process is (15–35) % compared to the data of the full-scale experiment.

The lower the excitation current of the generator i_f , the greater the error in modeling static modes Δ .

REFERENCES

1. Adkins, B. General theory of electrical machines. – Moscow: Gosenergoizdat, 1960. – 272 p.
2. Electric machines: guidelines for laboratory work / comp.: A. G. Kapustin, E. V. Balich, N. S. Karnaughov, R. Omelyusik. – Minsk: MSHAK, 2014. – Part 3. – 88 p.
3. Laibl, G. Theory of an electric machine in transient processes / G. Laibl. – Moscow: Gosenergoizdat, 1965. – 168 p.
4. Analytical design of controllers, optimal in accuracy and speed / V.V. Surkov, B.V. Sukhinin, V.I. Lovchakov, A.E. Soloviev // Tula State University. – Tula, 2005. – 300 p.
5. Vasiliev, D. Automatic control systems / D. Vasiliev, V. Chuich. – Riga: Palmarii Academic Edition, 2012. – 200 p.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Адкинс, Б. Общая теория электрических машин / Б.Адкинс. – М.: Госэнергоиздат, 1960. – 272 с.
2. Электрические машины: метод. указания к лабораторным работам. Часть 3 / Минский государственный авиационный колледж; сост.: Капустин А.Г., [и др.]. – Минск: МГВАК, 2014. – 88 с.
3. Лайбл, Г. Теория электрической машины в переходных процессах / Г.Лайбл. – М.: Госэнергоиздат, 1965. – 168 с.
4. Сурков, В.В. Аналитическое проектирование оптимальных по точности и быстродействию контроллеров / В.В. Сурков, [и др.] – Тула: Тульский государственный университет, 2005. –300 с.
5. Васильев, Д. Системы автоматического управления / Д.Васильев, В.Чуич. – Рига: Palmarii Academic Edition, 2012. – 200 с.

Статья поступила в редакцию
24.03.2021

УДК 004.932.2

А.А. ШЕЙНИКОВ, А.А. САНЬКО

ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА ПРИ СИНУСОИДАЛЬНОЙ ФАЗОСДВИГАЮЩЕЙ МОДУЛЯЦИИ СВЕТОВЫХ ЛУЧЕЙ

Алексей Алексеевич Шейников – кандидат технических наук, доцент кафедры авиационных радиоэлектронных систем учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь», Республика Беларусь af.varb.ao@yandex.ru

Андрей Анатольевич Санько – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой воздушных судов и авиационного оборудования учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь min.777.144@mail.ru

Aleksei Sheinikov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of the Military Academy of the Republic of Belarus af.varb.ao@yandex.ru

Andrey Sanko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Aircraft and Aviation Equipment of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus min.777.144@mail.ru

Аннотация: в статье представлен подход к повышению чувствительности волоконно-оптических гироскопов при синусоидальной фазосдвигающей модуляции световых лучей. Показана возможность увеличения максимальной чувствительности волоконно-оптического гироскопа по сравнению со значением этого параметра, достигнутым в результате применения известных подходов.

Ключевые слова: волоконно-оптический гироскоп, повышение чувствительности, фазосдвигающая модуляция, гармоническая составляющая.

Abstract: the article presents a way to increase the sensitivity of fiber-optic gyroscopes through the use of sinusoidal phase-shift modulation with the allocation of two harmonic components of the spectrum of the output light signal. The possibility of increasing the maximum sensitivity of a fiber-optic gyroscope in comparison with the current achieved value of this parameter is shown.

Keywords: fiber-optic gyroscope, increase in sensitivity, phase-shifting modulation, harmonic component.

Современные волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) имеют характеристики, удовлетворяющие требованиям к точности навигации (около 0,05 °/ч) для пилотируемых воздушных судов и тяжелых беспилотных летательных аппаратов (БЛА) с большой продолжительностью полета. Причем применение ВОГ позволяет улучшить показатель точность/масса для бортового навига-

ционного оборудования. Следует также учитывать, что в отличие от кольцевого лазерного гироскопа в ВОГ в качестве источника света может использоваться даже светодиод, что существенно снижает стоимость прибора [1]. Кроме того, появляется возможность полного отказа от использования сигналов коррекции, поступающих со спутниковых радионавигационных систем (СРНС),

что актуально для БЛА военного назначения. Так, тактический БЛА типа «Гриф-100», оснащенный навигационной системой на основе ВОГ со средними характеристиками (скорость дрейфа 0,1°/ч), в полете на максимальную дальность (5 час, 650 км) отклонится от маршрута на 3 км. Учитывая, что на максимальной высоте полета (статический потолок 3 км) при угле обзора объектива 60° в

поле зрения бортовой камеры попадает участок местности длиной (ширина) 3 км, можно говорить о приемлемой точности ВОГ при решении задач воздушной разведки в условиях отсутствия сигналов СРНС. Наиболее высокой точности ВОГ (0,001°/ч) добились такие производители как *Northrop Grumman, Honeywell, Ixsea, Al Cielo* (при такой точности ВОГ, отклонение БЛА, с учетом описанных выше начальных условий, составит всего 32 м). При этом, ведущее российское предприятие ООО «Физоптика» освоило производство ВОГ класса точности до 1°/ч [2]. На значение погрешности ВОГ влияют такие факторы как оптические потери, тепловые помехи, обратное рассеяние света, оптический эффект Керра и магнооптический эффект Фарарадея [3]. Точность ВОГ определяется качеством изготовления составляющих его оптических элементов (модуляторов, светофильтров, поляризаторов, волоконных контуров) их температурной, вибрационной и электромагнитной стабильностью, а также качеством их взаимной юстировки, обеспечиваемым при сборке. Предельную чувствительность ВОГ можно повысить за счет снижения глубины модуляции флуктуаций излучения. Это достигается путем повышения интенсивности источников лазерного излучения и уменьшения ширины полосы их излучения. Точность ВОГ может быть также повышенна за счет увеличения времени коherентности немонохроматических световых волн в оптическом волокне за счет применения различных методов селекции [4]. Кроме совершенствования конструкции и улучшения характеристик элементов особое значение в деле увеличения предельной чувствительности ВОГ играет способ обработки выходного светового сигнала.

Постановка задачи

Целью данного исследования является повышение чувствительности ВОГ за счет применения нового, более эффективного по сравнению с известными, способа обработки выходного светового сигнала.

Теоретический анализ

Для решения поставленной задачи требуется рассмотреть основы построения и функционирования

ВОГ. Принцип действия ВОГ основан на вихревом эффекте Саньяка в кольцевом интерферометре. Разность фаз встречных волн (фаза Саньяка) на выходе интерферометра определяется разностью оптических длин:

$$\varphi_s = 2\pi \frac{\Delta L}{\lambda}$$

где $\Delta L = \frac{4S}{c}\Omega$ — разность оптических длин; λ — длина волны оптического излучения; Ω — измеряемая угловая скорость вращения; $S = \pi R^2$ — площадь волоконно-оптического контура; R — радиус контура; c — скорость света.

В многовитковом контуре выражение для расчета фазы Саньяка можно представить в следующих эквивалентных видах:

$$\varphi_s = \frac{4\pi RL}{\lambda c} \Omega = \frac{8\pi^2 R^2 N}{\lambda c} \Omega,$$

где $L = 2\pi R$ — периметр контура; N — число витков.

Приняв, что волновые фронты световых пучков на выходе интерферометра совмещены идеально, интенсивность света в интерференционной картине можно рассчитать в соответствии с выражением:

$$I = 2I_0(1 + \cos(\varphi_s)),$$

где I — интенсивность света на фотодетекторе; I_0 — интенсивность источника излучения.

Таким образом, постоянно нарастающее изменение Ω ведет к гармоническому изменению выходного сигнала I . Другими словами, выходная характеристика ВОГ обладает существенной нелинейностью. Следует отметить, что в области малых скоростей вращения чувствительность к вращению минимальна, поскольку рабочая точка в этой области находится на плоской вершине косинуса. Для увеличения чувствительности ВОГ обычно используют смещение рабочей точки на кругом (почти линейном) участке выходной характеристики:

$$I = 2I_0(1 + \cos(\varphi_s + \varphi_m)),$$

где φ_m — смещение фазы, достигаемое применением в конструкции ВОГ взаимного фазового модулятора.

Из-за свойства взаимности обе световые волны испытывают одинаковую модуляцию, но сдвинутую по времени (время задержки $\tau_z = (dp/c)$, d — длина оптоволокна в катушке, p — показатель преломления волновода). В подавляющем большинстве технических решений (патенты RU 2246097, RU 2343417, RU 2512598, RU 2512599, RU 2472111, RU 2441202, RU 2523759, RU 2482450, RU 2500989) смещение рабочей точки достигается за счет применения прямоугольной модуляции генерируемого светового потока [3, 6]. В данном случае максимальная чувствительность ВОГ достигается при $\varphi_m = \frac{\pi}{2}$.

Одним из перспективных способов увеличения чувствительности ВОГ (способ, альтернативный прямоугольной модуляции) является применение гармонической модуляции типа $\varphi_m(t) = \varphi_{m0} \cos(2\pi f_m t)$, [5, 13]. В этом случае выходной сигнал может быть разложен на гармоники с частотой модуляции f_m :

$$I = 2I_0(1 + \cos(\varphi_s + \varphi_{m0} \cos(2\pi f_m t))).$$

После разложения этого выражения на составляющие и применения функции Бесселя оно принимает вид:

$$I = 2I_0 + 2I_0 \cos(\varphi_s) [J_0(\varphi_{m0}) + 2J_2(\varphi_{m0}) \cos(4\pi f_m t) + \dots] + \\ + 2I_0 \sin(\varphi_s) [2J_1(\varphi_{m0}) \sin(2\pi f_m t) + 2J_3(\varphi_{m0}) \sin(6\pi f_m t) + \dots] \quad (1)$$

где $J_0, J_1, J_2, J_3 \dots$ — функции Бесселя [7] первого рода, соответствующего порядка.

Из выражения видно, что четные гармоники пропорциональны $\cos(\varphi_s)$, а нечетные гармоники — $\sin(\varphi_s)$. В состоянии покоя ВОГ выходной сигнал в основном состоит из четных гармоник. При вращении ВОГ в спектре

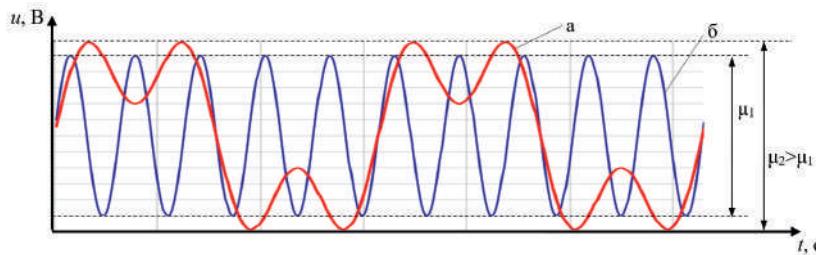


Рис. 1. Сумма двух первых нечетных гармоник выходного сигнала ВОГ а – модулированное колебание, представляющее собой сумму двух первых нечетных гармоник выходного сигнала; б – колебание, представляющее собой первую нечетную гармонику выходного сигнала; μ_1, μ_2 – чувствительность ВОГ в случае выделения одной и двух первых нечетных гармоник при синусоидальной фазосдвигающей модуляции световых лучей соответственно; u – напряжение; t – время

выходного сигнала появляются нечетные гармоники, характеризующие Ω . Патентный поиск показал (патенты RU 2152001; RU 2522147, WO 2014/077735), что для оценки Ω используют только первую нечетную гармонику выходного сигнала. При этом максимальная чувствительность ВОГ повышается на 12,7 % по сравнению с прямоугольной модуляцией.

Решение задачи

С учетом современного уровня технологий, существует возможность выделения нескольких гармонических составляющих сигнала [8]. В связи с этим дальнейшее увеличение чувствительности ВОГ предлагается обеспечить за счет использования суммы двух первых нечетных гармоник спектра выходного сигнала [9]. В этом случае максимальную чувствительность ВОГ можно повысить еще на:

$$\frac{\mu_2}{\mu_1} = \frac{4I_0 \sin(\varphi_s)(J_1(\varphi_{m0})\sin(2\pi f_m t) + J_3(\varphi_{m0})\sin(6\pi f_m t))}{4I_0 \sin(\varphi_s)J_1(\varphi_{m0})\sin(2\pi f_m t)} = 1 - \frac{J_3(\varphi_{m0})}{J_1(\varphi_{m0})} \quad (2)$$

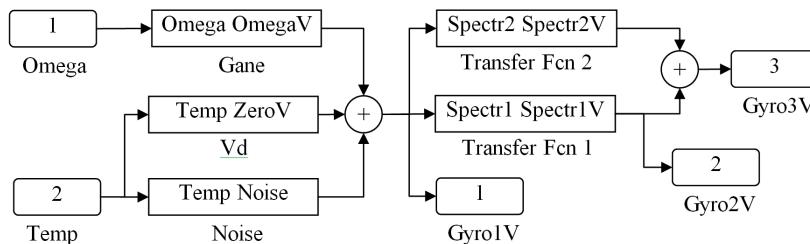


Рис. 2. Блок-диаграмма имитационной модели ВОГ с фазосдвигающей модуляцией генерируемого светового потока

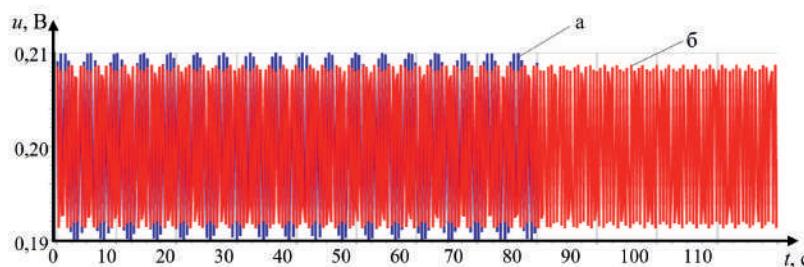


Рис. 3. Зависимость напряжения на выходе ВОГ для угловой скорости 40 °/с
а – дрейф выходного сигнала ВОГ в случае использования одной (первой) нечетной гармоники при синусоидальной фазосдвигающей модуляции световых лучей;
б – дрейф выходного сигнала ВОГ в случае использования двух первых нечетных гармоник при синусоидальной фазосдвигающей модуляции световых лучей

Для повышения чувствительности измерений выделение и обработку двух гармонических составляющих целесообразно осуществлять в соответствии с предложенным автором способом [10], предполагающим представление суммы двух выделенных гармоник в качестве модулированного колебания (рис. 1). Изменение амплитуды этого колебания, можно использовать как параметр, характеризующий Ω . Причем отношение приращения рассматриваемого параметра к изменению Ω будет больше чем в случае использования только первой нечетной гармоники выходного сигнала (рис. 1).

Для практической реализации предложенного подхода в функциональную схему ВОГ [1] следует добавить два избирательных блока для выделения первой и третьей гармоник спектра выходного сигнала, а также суммирующий блок, где будет производиться сложение гармоник [10].

Модель системы и экспериментальное исследование

Имитационное моделирование ВОГ производилось в соответствии с моделью прибора, представленной в [11]. При этом кроме блоков *Gane*, *Vd*, *Noize*, реализующих температурные зависимости масштабного коэффициента, дрейфа нуля и шума гироскопа в схему были включены: два блока передаточных функций *Transfer Fcn1* и *Transfer Fcn2*, реализующих полосовые фильтры, сумматор для сложения гармоник, а также два дополнительных выходных порта модели *Gyro2V* и *Gyro3V* для реализации вариантов выделения из выходного сигнала одной и двух нечетных гармоник соответственно (рис. 2).

На вход модели подавалось значение угловой скорости, а выходные данные накапливались для дальнейшего анализа. В результате моделирования были получены зависимости напряжения на выходе ВОГ от времени при фиксированном значении угловой скорости 40 °/с [12] для сравниваемых подходов к повышению чувствительности ВОГ: известного и предлагаемого (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что в случае применения предлагаемого под-

хода дрейф нулевого сигнала ВОГ уменьшается.

Теоретически результаты эксперимента можно объяснить с использованием функций Бесселя. Так, на рис. 4 приведены графики

функций Бесселя $J_\alpha(\varphi_{m0})$ первого рода для $\alpha = 0, 1, 2, 3$.

Анализ графиков показывает, что при $\varphi_{m0} = 5$ рад, отношение $\frac{J_3(\varphi_{m0})}{J_1(\varphi_{m0})} = -2$, а $\frac{\mu_2}{\mu_1} = 1 - (-2) = 3$ что со-

ответствует максимальному повышению чувствительности ВОГ на 38,1 % по сравнению с прямоугольной модуляцией и на 25,4 % по сравнению с синусоидальной модуляцией (при выделении одной гармоники).

Заключение

Таким образом, применение предлагаемого подхода обеспечивает существенное увеличение максимальной чувствительности ВОГ по сравнению с текущим достигнутым значением этого параметра. Повышение точности ВОГ, в свою очередь, позволяет говорить о возможности создания пилотажно-навигационных комплексов для тяжелых оперативно-тактических БЛА, не требующих коррекции по сигналам СРНС.

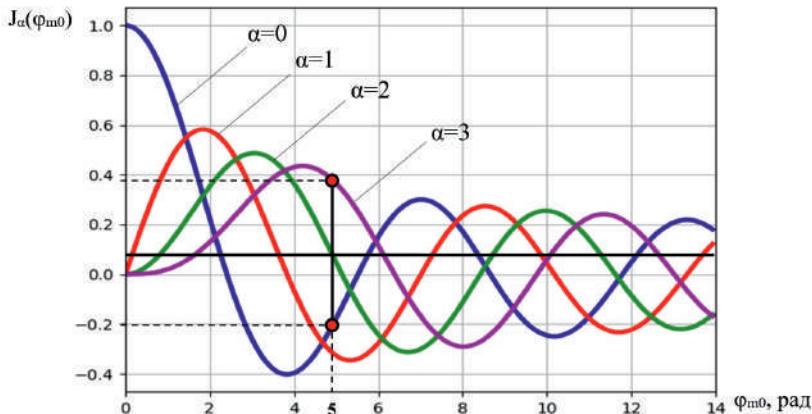


Рис. 4. Графики функций Бесселя первого рода

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Сущенко, О.А. Обзор современного состояния волоконно-оптических датчиков угловой скорости и тенденции их развития / О.А. Сущенко, В.В. Пальчик // Электроника и системы управления - 2011. - №3(29). - С. 74–84.
- Олехнович, Р.О. Пути создания волоконно-оптического гироскопа повышенной точности: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.01 / Р.О. Олехнович. - Спб., 2010. - 115 л.
- Курбатов, А.М. Повышение точности волоконно-оптического гироскопа за счет подавления паразитных эффектов в интегрально-оптических фазовых модуляторах / А.М. Курбатов, Р.А. Курбатов, А.М. Горячkin // Гирoscopия и навигация. - 2019. - № 2(105). - С. 52–69.
- Андронова, И.А. Физические проблемы волоконной гирoscopии на эффекте Сантьяго / И.А. Андронова, Г.Б. Малыкин // Успехи физич. наук - 2002. - №8. - С. 849–873.
- Горохов, С.Л. Волоконно-оптические гироскопы (обзор) / С.Л. Горохов // Научно-технич. вестник информац. технологий, механики и оптики - 2005. - №4(20). - С. 60–67.
- Будanova, А.Ю. Модуляция сигнала в волоконно-оптическом гироскопе / А.Ю. Будanova, Е.О. Неронова // УНФ. - 2003. - № 4. - С. 157–161.
- Гоноровский, И.С. Радиотехнические цепи и сигналы / И.С. Гоноровский. - М.: Дрофа, 2006. - 719 с.
- Ревин, В.Т. Преобразование и преобразователи измерительной информации: учеб. пособие: в 5 ч. / В.Т. Ревин. - Минск: БГУИР, 2002. - Ч.1. - 70 с.
- Гутников, В.С. Фильтрация измерительных сигналов / В.С. Гутников. - Л.: Энерготомиздат, 1990. - 192 с.
- Способ контроля витковой изоляции обмотки якоря электрической машины: пат. BY 16628 / А.А. Шейников, Ю.В. Суходолов, А.Н. Малашин, В.Р. Вашкевич. - Опубл. 27.08.12.
- Лукин, К. Имитационная модель волоконно-оптического гироскопа / К. Лукин, Д. Павлов // Фотоника - 2014. - №3(45). - С. 82–85.
- Полякова, Д.В. Разработка модели волоконно-оптического гироскопа в среде Simulink / Д.В. Полякова, К.Г. Лукин, М.Н. Петров // Вестник новгородского государственного университета. - 2012. - № 68. - С. 106–109.
- Курбатов, А. М. О новых путях совершенствования волоконно-оптических гироскопов с открытым и закрытым контуром обратной связи // Гирoscopия и навигация. - 2015. - № 1. - С. 43–60.
- Suschenko, O.A. Overview of the current state of fiber-optic angular velocity sensors and their development trends / O.A. Suschenko, V.V. Finger // Electronics and control systems - 2011. - No. 3 (29). - P. 74–84.
- Olehnovich, R.O. Ways to create a fiber-optic gyroscope of increased accuracy: dis. ... cand. tech. Sciences: 05.11.01 / R.O. Olehnovich. - SPb., 2010. - 115 p.
- Kurbatov, A.M. Improving the Accuracy of a Fiber Optic Gyroscope by Suppressing Parasitic Effects in Integrated Optical Phase Modulators / A.M. Kurbatov, R.A. Kurbatov, A.M. Goryachkin // Gyroscopy and navigation. - 2019. - No. 2 (105). - P. 52–69.
- Andronova, I.A. Physical problems of fiber gyroscope based on the Sagnac effect / I.A. Andronova, G.B. Malykin // Successes physical. Sciences - 2002. - No. 8. - P. 849–873.
- Gorokhov, S.L. Fiber optic gyroscopes (review) / S.L. Gorokhov // Scientific and Technical information bulletin technology, mechanics and optics - 2005. - No. 4 (20). - P. 60–67.
- Budanova, A.Yu. Modulation of a signal in a fiber-optic gyroscope / A.Yu. Budanova, E.O. Neronova // UNF. - 2003. - No. 4. - P. 157–161.
- Gonorovsky, I.S. Radio engineering circuits and signals / I.S. Honorovsky. - M.: Bustard, 2006. - 719 p.
- Revin, V.T. Transformation and converters of measuring information: textbook. allowance: in 5 hours / V.T. Revin. - Minsk: BSUIR, 2002. - Part 1. - 70 p.
- Gutnikov, V.S. Filtering of measuring signals / V.S. Gutnikov. - L.: Energoatomizdat, 1990. -- 192 p.
- Method of control of the coil insulation of the armature winding of an electric machine: pat. BY 16628 / A.A. Sheinikov, Yu.V. Sukhodolov, A.N. Malashin, V.R. Vashkevich. - Publ. date 27.08.12.
- Lukin, K. Simulation model of a fiber-optic gyroscope / K. Lukin, D. Pavlov // Photonics - 2014. - №3 (45). - P. 82–85.
- Polyakova, D.V. Development of a model of a fiber-optic gyroscope in the Simulink environment / D.V. Polyakova, K.G. Lukin, M.N. Petrov // Bulletin of the Novgorod State University. - 2012. - No. 68. - P. 106–109.
- Kurbatov, A. M. On new ways of improving fiber-optic gyroscopes with open and closed feedback loop / A. M. Kurbatov // Gyroscopy and navigation. - 2015. - No. 1. - P. 43–60.

Статья поступила в редакцию
18.02.2021

СОВМЕСТНАЯ СТАТИСТИЧЕСКАЯ И КОНТИНУАЛЬНАЯ АЭРОДИНАМИКА

Леонид Иванович Гречихин – доктор физико-математических наук профессор, профессор кафедры технической эксплуатации авиационного и радиоэлектронного оборудования 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 Technical Operation of Aviation and Radioelectronic Equipment of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
gretchihin@yandex.ru

Аннотация: рассмотрены основы статистической аэродинамики и континуальной аэродинамики. Проведен анализ газодинамического взаимодействия потока воздуха при непосредственном ударе каждой молекулы воздуха с поверхностью обтекаемого тела. Показано, что в уравнении Бернулли следует учитывать тангенциальную скорость потока, а не скорость движения самого потока. При наличии кривизны у обтекаемой поверхности следует учитывать возникающие центробежные ускорения и центробежные силы. Разработана теория срывного течения. Дано описание формирования оледенения винтов и крыльев самолета. Приведены конкретные расчеты обтекания фюзеляжа, крыльев, винтов и лопастей турбин.

Ключевые слова: статистическая теория, аэродинамика д-Аламбера-Эйлера, тепловой насос, оледенение, воздушный винт, турбина.

Abstract: the foundations of statistical and continual aerodynamics are considered. The analysis of the gas-dynamic interaction if the air flow at the direct impact of each air molecule with the surface of the streamlined body is carried out. It is shown that in the Bernoulli equation one should take into account the tangential velocity of the flow, and not the velocity of the flow itself. In the presence of curvature at the streamlined surface, centrifugal accelerations and centrifugal forces should be taken into account. The description of the stall flow is given. A model for the formation of glaciation of propellers and wings of an aircraft has been developed. Concrete calculations of the flow around the fuselage, wings, propellers and turbine blades are presented.

Keywords: statistical theory, d-Alambert-Euler aerodynamics, heat pump, glaciation, air propeller, turbine.

Газодинамика в авиации является основой для конструирования и эксплуатации разных летательных аппаратов (ЛА) в атмосфере Земли. Полёт самолетов основан на законах динамической газодинамики. В динамической газодинамике применяются два подхода: континуальный и статистический. Континуальный подход был предложен д-Аламбером, а затем развит Эйлером, а основы статистического подхода разработаны Ньютона. Так называемая «корпускулярная теория Ньютона».

При континуальном подходе лобовое сопротивление тела, рав-

номерно движущегося в неподвижной атмосфере, равно нулю, так как возникающая за телом сила отдачи компенсирует силу лобового сопротивления вследствие искривления потока воздуха. Корпускулярная теория Ньютона наоборот приводила к чрезмерно большому лобовому сопротивлению.

Многие результаты, полученные в рамках континуального подхода, представляют как научный, так и практический интерес. Континуальное обтекание описывается уравнениями: неразрывности, Навье-Стокса, Эйлера и Бернуlli. Во всех этих уравнениях не рассма-

тривается непосредственный процесс взаимодействия воздушного потока с движущимся летательным аппаратом. Обычно рассматривается поток воздуха на входе перед ЛА и его трансформация на выходе. При этом процесс непосредственного взаимодействия с каждым элементом ЛА исключается. В результате влияние конкретных конструктивных особенностей на динамику взаимодействия воздушного потока учитывается недостаточно последовательно, а влияние срывного течения вообще исключено. Кроме этого при столкновении молекул воздуха с

поверхностью твердого тела не учитывается структура поверхности. В этой связи возникла цель: рассмотреть процесс непосредственного взаимодействия воздушного потока с поверхностью летательного аппарата (ЛА) на основе совместного действия континуального и статистического подхода с учетом возникновения срывного течения, а также какая доля энергии передается при ударе молекул воздуха о поверхность летательного аппарата при дозвуковом полете.

Поставленная цель может быть достигнута путем решения следующих задач:

1. Математически описать динамику взаимодействия набегающего потока воздуха с поверхностью ЛА с применением статистической газодинамики.
 2. Математически описать динамику взаимодействия набегающего потока воздуха с поверхностью ЛА с применением континуальной газодинамики.
 3. Выяснить какое влияние оказывает срывное течение на подъемную силу и лобовое сопротивление летательного аппарата.
 4. Обосновать величину доли энергии, которая передается поверхности летательного аппарата в процессе взаимодействия молекул воздуха с летательным аппаратом.
 5. Провести компьютерное моделирование полета ЛА в реальных условиях.
- Каждая из перечисленных задач достаточно сложная в математическом описании. Поэтому необходимо создавать свое программное обеспечение для каждого конкретного вида ЛА и его отдельно взятого элемента.
- В настоящей работе последовательно рассмотрим перечисленные задачи для решения поставленной цели с общих позиций на примере движения плоской пластины в нормальных условиях.

Основы статистической аэродинамики

В статистической аэродинамике рассматривается процесс взаимодействия каждой молекулы воздуха с поверхностью летательно-

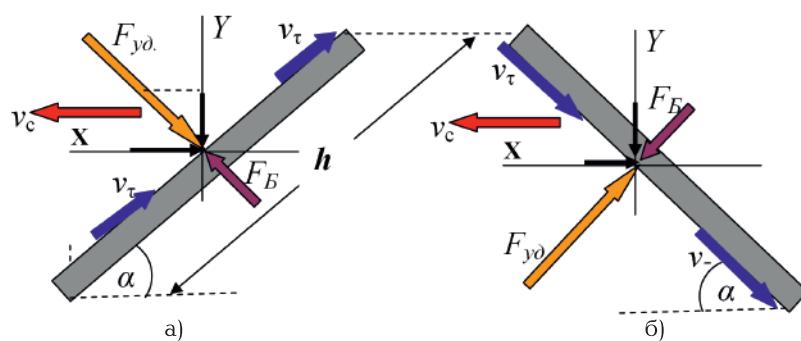


Рис. 1. Взаимодействие движущейся пластины с воздухом при:
а) отрицательном угле атаки; б) положительном угле атаки

го аппарата. Такая аэродинамика детально представлена в работах [1–3].

Рассмотрим, как происходит процесс взаимодействия каждой молекулы воздуха с обтекаемой поверхностью. На рис. 1 показана схема такого взаимодействия. При столкновении каждой молекулы воздуха с поверхностью происходит изменение скорости ее движения по нормали к поверхности и тангенциально поверхности. Эти изменения скорости равны

$$\Delta v_n = v_c \sin(\alpha) \text{ и } \Delta v_t = v_c \cos(\alpha) \quad (1)$$

где α — угол атаки.

Поток массы воздуха на элемент поверхности ΔS равен:

$$\Delta \dot{m} = \rho v_c \Delta S \quad (2)$$

Декартовую систему координат XY расположим в плоскости чертежа (рис. 1), а ось Z направлена перпендикулярно плоскости чертежа. В этом случае элемент площади $\Delta S = \Delta y \Delta z$.

Следует рассматривать два случая, когда пластина движется в неподвижной атмосфере и когда она покоится и обтекается потоком газа. Как в первом, так и во втором случае масса газа, которая воздействует по нормали на элемент поверхности ΔS , равна

$$\Delta \dot{m}' = \rho \Delta v_n \Delta S = \rho v_c \sin(\alpha) \Delta S \quad (3)$$

Тогда сила, с которой поток воздуха действует на элемент поверхности ΔS , в соответствии со вторым законом Ньютона вдоль оси X-ов для случая, когда пластина движется в неподвижной атмосфере, равна:

$$\Delta F_{y\partial,n} = \Delta \dot{m} \Delta v_n = \rho v_c^2 \sin^2(\alpha) \Delta S \quad (4)$$

Отсюда сила действия вдоль оси Y-ов:

$$\Delta F_{y\partial,y} = \rho v_c^2 \cos(\alpha) \sin^2(\alpha) \Delta S \quad (5)$$

а вдоль оси X-ов

$$\Delta F_{y\partial,x} = \rho v_c^2 \sin^3(\alpha) \Delta S \quad (6)$$

Когда пластина покоятся и обтекается воздушным потоком без учета потерь энергии молекул воздуха при столкновении с поверхностью, то равенства (5) и (6) возрастают в два раза. Такая ситуация реализуется в аэродинамических трубах. В этой связи результаты, полученные на аэродинамических трубах нельзя использовать для анализа полета летательного аппарата в реальной атмосфере.

При воздействии движущегося плоского тела на неподвижный газ под некоторым углом к поверхности часть потока будет совершать движение вдоль поверхности. Как такое движение газа будет воздействовать на движущееся тело, следует рассматривать с позиций континуальной аэродинамики.

Континуальная аэродинамика

Континуальный режим формируется тангенциальным потоком воздуха и обуславливает: возможность применения уравнения Бернулли, а при наличии кривизны у обтекаемой поверхности возникают центробежные силы [3]. Следовательно, при движении газа вдоль поверхности со скоростью Δv_t в соответствии с уравнением Бернулли возникает дополнительное давление, равное вдоль оси X-ов:

$$\Delta F_{B,x} = \frac{\rho(\Delta v_\tau)^2}{2} \Delta S = \\ = 0,5 \rho v_c^2 \cos^3(\alpha) \Delta S \quad (7)$$

а вдоль оси Y-ов

$$\Delta F_{B,y} = 0,5 \rho v_c^2 \cos^2(\alpha) \sin(\alpha) \Delta S \quad (8)$$

Если обтекаемая поверхность обладает кривизной, то наряду с законом Бернульи следует учитывать центробежные силы. В этом случае следует рассматривать континуальный режим обтекания, применяя закон Бернульи совместно с центробежной силой. При этом для положительной кривизны поверхности центробежные силы и силы, обусловленные законом Бернульи, взаимно усиливают друг друга, а при отрицательной кривизне — взаимно ослабляют друг друга. Если элемент поверхности ΔS обладает радиусом кривизны R , то на такой элемент поверхности действует центробежная сила вдоль оси X-ов, равная:

$$\Delta F_{H,x} = \frac{\Delta m_{pes.} \Delta t \Delta v_\tau^2}{R} = \\ = \frac{\rho v_c^2 \cos^3(\alpha) \Delta x \Delta S}{R} \quad (9)$$

а вдоль оси Y-ов

$$\Delta F_{H,y} = \frac{\rho v_c^2 \cos^2(\alpha) \sin(\alpha) \Delta x \Delta S}{R} \quad (10)$$

В формулах (9) и (10) время взаимодействия потока воздуха с элементом поверхности ΔS определяется следующим образом:

$$\Delta t = \frac{\Delta l}{\Delta v_\tau} = \frac{\Delta x}{v_c \cos^2(\alpha)} \quad (11)$$

Результирующая сила действия потока воздуха на элемент поверхности ΔS вдоль оси X-ов и Y-ов при статистическом и континуальном режимах обтекания равны соответственно:

$$\Delta F_{pes,x} = \Delta F_{yob,x} \pm \Delta F_{H,x} + \Delta F_{B,x}; \quad (12) \\ \Delta F_{pes,y} = \Delta F_{yob,y} \pm \Delta F_{H,y} + \Delta F_{B,y}$$

В уравнениях (12) при выпуклой поверхности используется знак (−) для оси X-ов и знак (+) для оси Y-ов, а при вогнутой поверхности знаки изменяются на противоположные.

Полученные силы полностью определяют динамику полета

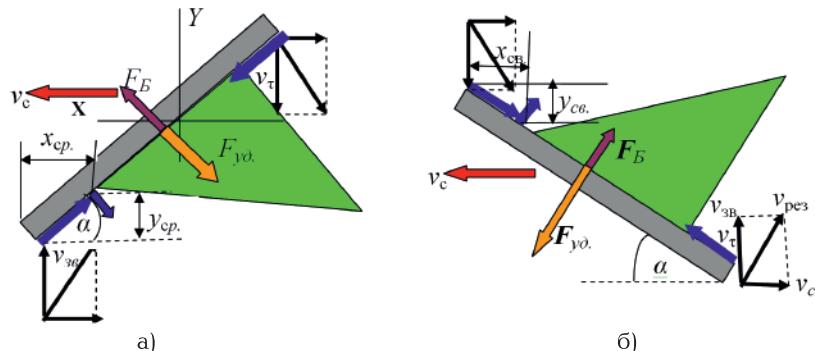


Рис. 2. Взаимодействие движущейся пластины с воздухом в тыльной стороне при:
а) отрицательном угле атаки; б) положительном угле атаки

летательного аппарата. В тыльной стороне за плоской поверхностью происходит срыв течения. Поэтому следует учитывать возникающие силы при срывном течении.

Срывное течение

За движущейся пластиной в ее тыльной стороне возникает зона разрежения. Процесс заполнения зоны разрежения для отрицательного угла атаки показан на рис. 2, а, а для положительного угла атаки — на рис. 2, б. На обоих рисунках потоки воздуха, которые заполняют зону разрежения, с боковых стенок взаимно противоположны и идентичные, а сверху и снизу потоки воздуха вдоль тыльной поверхности разные. Результирующая тангенциальная скорость, как при положительном, так и при отрицательном угле атаки равна

$$v_\tau = v_p \cos(\alpha + \beta) \quad (13)$$

где $v_p = \sqrt{v_{\infty}^2 + v_c^2}$ и $\delta = \arctg\left(\frac{v_c}{v_{\infty}}\right)$.

С такой скоростью снизу вверх движется поток воздуха вдоль тыльной стороны пластины и сталкивается с потоком воздуха, движущегося с верхней кромки пластины, образуя четырехгранный конус с потоком воздуха снизу вверх. На основании закона сохранения массы следует: количество воздуха, которое возмущается движущейся пластиной, равно массе воздуха, заполняющей зону разрежения со всех четырех сторон. В соответствии с законом сохранения массы при $h \approx L$ реализуется равенство

$$\rho_\infty S_n v_c \Delta t \geq 4 \rho \left(\frac{1}{2} x_{cp,y} \right) L \quad (14^*)$$

здесь $\Delta t = y/v_{\infty}$.

Из (14) получаем

$$x_{cp} = 0,5 \frac{\rho_\infty h v_c \sin(\alpha)}{\rho} \frac{v_{\infty}}{v_c} \quad (15)$$

здесь $v_{\infty} = \sqrt{\gamma k_b T / m_a}$ — скорость звука, γ — отношение теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме, k_b — постоянная Больцмана, m_a — средняя масса молекул воздуха, а плотность воздуха в зоне разрежения

$$\rho = \rho_\infty \exp\left(-\frac{m_a v_{\tau,pes}^2}{2 k_b T}\right) \quad (16)$$

На расстоянии x_{cp} разность давлений в зоне разрежения и окружающей среды выравнивается. Поэтому поступление воздуха из окружающей среды в зону разрежения прекращается. Вследствие этого за пластиной образуется срыв течения с пониженным давлением, определяемым по формуле:

$$P = P_\infty \exp\left(-\frac{m v_{\tau,pes}^2}{2 k_b T}\right) \quad (17)$$

или

$$P = P_\infty - 0,5 \rho v_{\tau,pes}^2$$

Вершина угла четырехгранного конуса в плоскости XY составляет $\pi/2 - \delta$. Отсюда следует, что с ростом скорости движения пластины возрастает удаление вершины конуса от пластины. При движении пластины со скоростью

* На первый взгляд это кажется надуманной ситуацией. Поэтому такое видение процесса пришлось доказывать экспериментально на специально созданных установках для шара и для разных винтов. Полученные результаты опубликованы в работах [4-6].

звука вершина конуса составляет угол $\pi/4$.

До расстояния x_{cp} , тангенциальная составляющая скорости заполнения зоны разрежения определена выше по формуле (13), а нормальная приобретает значения

$$v_n = v_c \sin(\alpha + \delta). \quad (18)$$

Массу воздуха, участвующую в заполнении зоны разрежения и ударно воздействующую на пластину, следует учитывать только с трех сторон — две боковых и верхнюю сторону пластины. В нижней стороне пластины нормальная составляющая скорости заполнения зоны разрежения меньше, чем в ее верхней области. В результате на пластину действует момент силы относительно центра тяжести, устанавливая ее вдоль потока с минимальным лобовым сопротивлением.

В пренебрежении силой ударного действия в нижней области пластины

$$\begin{aligned} F'_{y\partial,n} &= \frac{d}{dt} \left(\frac{3}{4} m 2 v_{n,pez} \right) = \\ &= \frac{3}{2} \rho_\infty h L v_{n,pez} v_c \sin(\alpha). \end{aligned} \quad (19)$$

Эта сила ударного действия уменьшает лобовое сопротивление движущейся пластины, а сила, обусловленная законом Бернулли, наоборот увеличивает лобовое сопротивление и преимущественно реализуется только с нижней стороны. С учетом (13) газодинамическая сила равна

$$F'_{b,n} = 0,5 \rho v_{t,pez}^2 x_{cp} L / \cos(\alpha). \quad (20)$$

Результирующая сила есть разность

$$F'_{pez,n} = F'_{b,n} - F'_{y\partial,n}. \quad (21)$$

Эта сила вдоль оси X -ов определяет лобовое сопротивление, а вдоль оси Y -ов — подъемную силу.

Масса воздуха в области разрежения, сосредоточена в четырехгранном конусе и является неподвижной относительно пластины. Поэтому она создает газодинамическую силу, обусловленную разностью давлений между передней и задней стенками движущейся пластины. Эта сила вдоль

оси X -ов равна

$$F''_n = (P_\infty - P)(hL - 4x_{cp}L/\cos(\alpha)). \quad (22)$$

Здесь давление P определяется по формуле (17).

Следовательно, общая сила, которая воздействует на движущуюся пластину с передней и задней стороны нормально ее поверхности, равна

$$F_{n,общ} = F_{n,pez} + F'_{pez,n} + F''_n. \quad (23)$$

На основании (23) пластина, движущаяся с отрицательным углом атаки, испытывает лобовое сопротивление

$$\bar{P}_X = F_{n,общ} \sin(\alpha) \quad (24)$$

и подъемную силу

$$\bar{P}_Y = F_{n,общ} \cos(\alpha) \quad (25)$$

Сила действия потока воздуха на всю поверхность, с которой происходит взаимодействие независимо от направления:

$$F_{pez} = \int_S \frac{\Delta F_{pez}(y,z)}{S} dy dz \quad (26)$$

Вычисление интеграла вдоль оси X -ов позволяет получать лобовое сопротивление ΛA , а вдоль оси Y -ов — подъемную силу крыла самолета.

Статистический подход анализа газодинамического обтекания существенным образом отличается от континуального подхода. Континуальный подход не позволяет определять изменение внутренней энергии газа в процессе взаимодействия с поверхностью движущегося тела. Передача энергии при ударе молекул воздуха о поверхность происходит вследствие упругого удара не со всей поверхностью летательного аппарата, а путем столкновения с кластерами этой поверхности. Рассмотрим этот процесс передачи энергии подробнее.

Взаимодействие молекул воздуха с поверхностными кластерами твердого тела

Поверхность твердого тела формируется не объемными кластерами, как внутри твердого тела (кристалла), а плоскими кластерами. Это убедительно доказано, когда для анализа поверхности

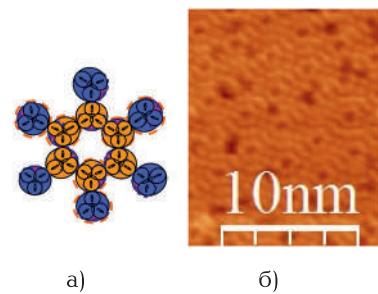


Рис. 3. а) Теоретический расчет кластера из трехатомных молекул;
б) поверхность кремния – эксперимент

кристалла применили туннельный микроскоп с разрешением в 1 Å. Применительно к кремнию в работе [7] показано, что поверхность кремния формируется кластерами, состоящими из трехатомных молекул. Теоретический расчет кластера в сравнении с экспериментом показан на рис. 3. На поверхности кремния плоские кластеры сцепляются друг с другом. Эксперимент выполнен при температуре ~ 500 К. Поэтому на поверхности много дефектов вследствие разрушения второго координационного слоя. В нормальных условиях дефекты будут устранены. Тогда вероятность столкновения с кластером молекул воздуха составит на основании рис. 3, а $p_1 = 7/19 \cong 0.368$. В результате упругого удара происходит передача энергии от молекулы воздуха к движущемуся телу с вероятностью, равной [2]:

$$\theta = \frac{4mM_{kl}}{(m+M_{kl})^2} \quad (27)$$

где m — средняя масса молекул воздуха, а M_{kl} — масса кластера материала поверхности. Кристалл алюминия формируется трехатомными молекулами. Следовательно, масса поверхностного кластера алюминия $M_{kl} = 12.26,98 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} = 5,37 \cdot 10^{-25}$ кг и $\theta = 0,3018$. Следовательно, молекулы воздуха переносят на поверхность ΛA в единицу времени на площадь всей конструкции S_k следующее количество энергии:

$$\dot{Q} = p_1 \theta \frac{1}{6} n \bar{v} c_v S_k \Delta T \quad (28)$$

Здесь n — концентрация молекул воздуха в потоке, $\bar{v} = \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}}$ — среднеквадратическая скорость молекул воздуха, $c_v = ik_B/2$

(i — число степеней свободы) — удельная теплоемкость. При столкновении молекул воздуха с дюралевой поверхностью на высоте полета ~ 5 км. $\dot{Q} = 5,07 \cdot 10^3 S_k \Delta TS_k$. На один квадратный метр внешней поверхности при разности температур в один градус за единицу времени будет передано энергии в нормальных условиях ~ 5 кДж. Это достаточно большая энергия, которой не позволительно пренебречь.

На изменение скорости течения воздуха у поверхности движущегося тела тратится энергия за счет внутренней энергии воздуха. Поэтому

$$\Delta E = \frac{m(\Delta v_n^2 + \Delta v_r^2)}{2} \Delta t = \\ = \frac{\dot{m} \Delta t}{\mu} \frac{i}{2} R \Delta T \quad (29)$$

Например, при угле падения 45° со скоростью движения 100 м/с падение температуры воздуха в пристеночном слое составит ~ 4 К. Когда разогрев поверхности при упругом ударе не превосходит охлаждения вследствие изменения скорости движения потока воздуха, тогда возникает оледенение. С этим явлением столкнулись на заре развития авиации и поэтому на всех самолетах используются противооледенительные системы. Это явление следует учитывать особенно при работе винтов.

Компьютерное моделирование

Конкретный расчет лобового сопротивления и подъемной

силы крыла самолета ТУ-134 был выполнен в работе [2]. Результаты приведены на рис. 4. Как лобовое сопротивление, так и подъемная сила крыла самолета резко зависит от угла атаки. Это явление следует учитывать при взлете и посадке самолета ТУ-134.

Преодоление лобового сопротивления осуществляется тяговыми усилиями двигателей. Для самолета ТУ-134 при крейсерском полете со скоростью 900 км/ч на высоте 9 км тяговые усилия каждого двигателя составляют $1,6$ Т. Скорость истечения продуктов горения ~ 600 м/с. Мощность тяговых усилий обоих двигателей получается ~ 25240 Л.С. На вращение турбин мощности не остается. Однако мощность, развиваемая турбами высокого давления, составляет 34000 Л.С., а мощность турбин низкого давления ~ 19500 Л.С. Результирующая мощность, которую развивают турбины, равна 53500 Л.С. [8]. Получается, что турбины работают как тепловой насос с достаточно высоким коэффициентом преобразования. В двигателе D-30 II серии используются две турбины высокого и низкого давления. Турбина высокого давления содержит два диска. На первом диске расположено 88 лопаток, размер которых по хорде, обращенной к потоку, 3 см, размер входного межлопаточного канала ~ 2 см, установочный угол $\sim 45^\circ$. Сопловой аппарат направляет поток воздуха в межлопаточный канал под углом в среднем 51° . Скорость потока на выходе из сопла Лаваля ~ 190 м/с, а скорость вращения турбины 196 об/с. Средняя высота лопаток 8 см. В соответствии с этими данными на оси одного диска турбины высокого давления реализуется мощность 6430 кВт. На самолете ТУ-134 используются два двигателя D-30 II серии и турбины высокого давления потребляют мощность 34000 Л.С. [9]. В достаточно грубом приближении теоретический расчет дает 34650 Л.С. Совпадение теории с практикой весьма убедительное. Поэтому разработанная теория с применением статистической газодинамики и срывного течения может быть рекомендована для компьютерного моделирования работы турбины, а также

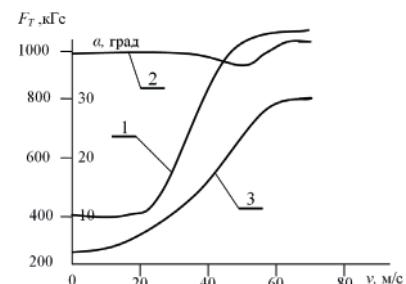


Рис. 5. Зависимость от скорости движения самолета АН-2 при работе двигателя 0,85 номинального:
1 — лобового сопротивления;
2 — тягового усилия;
3 — угла атаки лопастей винта

тянущих и толкающих винтов.

Аналогичный расчет лобового сопротивления и тяговых усилий был выполнен для винтов АВ-2 и АВ-72, которые используются на самолетах АН-2 и АН-24. Так для винта АВ-72 при крейсерской скорости 50 м/с и угле атаки 19° результирующая тяга 41483 Н, а для винта АВ-2 результирующее лобовое сопротивление в момент отрыва от взлетной полосы 110 км/ч самолета АН-2, угол атаки винта 8° и регулируемой скорости вращения винта 1400 об/мин составляет 450 кГс, а при крейсерской скорости 180 км/ч на высоте полета 4500 м и максимальном угле атаки 32° результирующее лобовое сопротивление $F_{Lc} \sim 1015$ кГс. Теоретический расчет механического момента на валу винта и мощности для поддержания заданной скорости вращения составляют в первом случае 260 кГс и 281 Л.С., а во втором случае — 680 кГс и 736 Л.С., что соответствует экспериментальным данным [10].

Тяга винта осуществляется вследствие возникновения активной составляющей окружающей среды. Отношение мощности, затрачиваемой окружающей средой в стационарных условиях на поддержание скорости движения самолета, к мощности преодоления лобового сопротивления является коэффициентом преобразования, а не коэффициентом полезного действия. В данном случае реализуется тепловой насос, для которого коэффициент преобразования составляет:

$$\eta = \frac{F_{max} V_c}{F_{Lc} \pi n L} \quad (30)$$

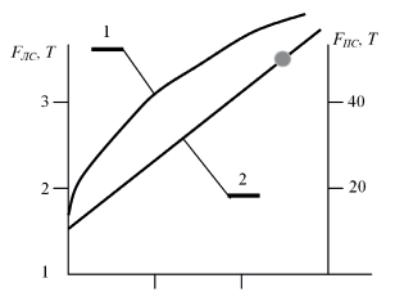


Рис. 4. Зависимость результирующих лобового сопротивления (1) и подъемной силы (2) при крейсерском полете самолета ТУ-134 на высоте 9 км со скоростью движения 900 км/час от угла атаки

Конкретно для винта АВ-72 при скорости движения самолета 23 м/с и угле атаки 9° коэффициент преобразования равен 1,04, а при скорости движения 50 м/с с углом атаки 19° составляет 1,06. Для тепловых насосов коэффициенты преобразования достигнуты более 10-и. По этому параметру винт АВ-72 не являются оптимальными. При взлете и посадке винтомоторного самолета необходимо обеспечить плавный переход от одного к другому режиму работы винта. Чтобы обеспечить такой переход необходимо угол кручения для винта АВ-72 обеспечить ~23°. Результаты теоретического расчета полета самолета АН-2 с винтом АВ-2 приведены на рис. 5.

Изменяя конструкцию винта можно получить коэффициент преобразования при соответствующем угле атаки 10 и более. В этой связи необходимо создавать новые конструкции воздушных гребных винтов с более эффективным коэффициентом преобразования. Например, более эффективными оказались саблевидные лопасти гребных винтов, которые установлены на самолете АН-70. Авторы работы [11] предложили гребной винт двойной саблевидности, лопасти которого построены из спиральных участков в виде трех полуколец с поверхностью Мёбиуса. В результате такой винт позволил увеличить тягу как минимум в два и более раза по сравнению с традиционным трехлопастным винтом такого же диаметра.

Следовательно, общий принцип работы винта самолета определяется возникновением срывного течения, которое обеспечивает принцип преобразования энергии типа вихревого теплового насоса. При разработке гребных винтов следует руководствоваться уже достигнутыми результатами по их конструированию, но решительным образом отказаться от ранее бытовавших представлений о вихревом характере возникновения тяговых усилий с определением коэффициента полезного действия, как не соответствующих современному уровню знаний в этой области. Экспериментальную аэrodинамику следует использовать только для уточнения модели характера взаимодействия воздушного гребного винта с окружаю-

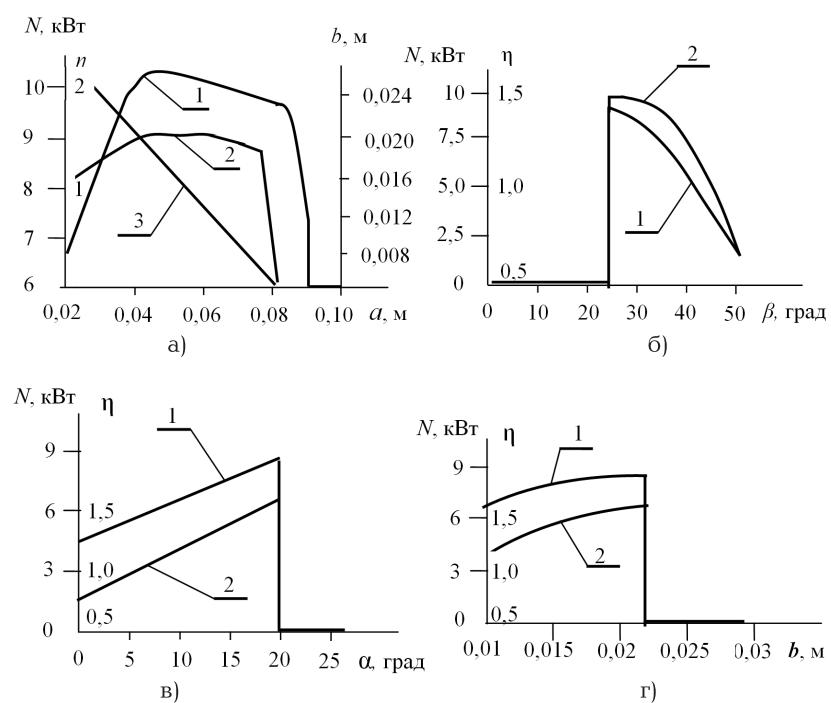


Рис. 6. Зависимость мощности турбины (1) и коэффициента преобразования (2) от различных изменяемых параметров:

- максимальной мощности от размеров лопатки (3) – размер малой полуоси эллипса при $\alpha = 20^\circ$, $\beta = 25^\circ$;
- угла атаки потока воздуха при $a = 0,03$ м, $b = 0,022$ м, $\alpha = 20^\circ$;
- угла поворота большой оси эллипса при $a = 0,03$ м, $b = 0,022$ м, $\alpha = 25^\circ$;
- малой оси эллипса при $a = 0,03$ м, $\alpha = 20^\circ$, $\beta = 25^\circ$.

щей неподвижной атмосферой, а в последующем перейти на полное компьютерное моделирование при создании новых типов винтомоторных летательных аппаратов различного назначения. Для этого необходимо разработать аэродинамику винтомоторного самолета с учетом всех его конструктивных элементов от винта до хвостового оперения на новых физических принципах.

Статистическая аэродинамика позволила установить принцип работы турбины, которая преобразует тепловую энергию в меха-

ническую работу. Для турбовентиляторных и турбореактивных двигателей турбины являются основным элементом, который обеспечивает работу двигателя.

Конкретный расчет работы турбины, у которой лопатки аппроксимированы эллипсом, приведен на рис. 6.

Как работают турбины, рассмотрим на примере двигателя D-30 II серии, установленного на самолете ТУ-134. При крейсерском полете (номинальный режим) расход топлива составляет 1432 кг/час [9]. Общая энергия,

Таблица – Исходные данные для крыльев Clark – YN -11% и Clark – YN – 14%

Тип крыла	Верх/ низ	a , м	b , м	r , м	$k_{n, (6)}$, 1/м	β^0
Clark - YN - 11%	Верх	0.15	0.04059	0.2975	1.804	6.6°
	Низ	0.10	0.01455	0.3441	1.485	2.13°
Clark - YN - 14%	Верх	0.33	0.0517	0.244	2.296	8.4°
	Низ	0.19	0.0189	0.274	1.890	2.7°

которая выделяется в единицу времени при полном сгорании топлива ~ 23 200 А.С. Полученная мощность расходуется на преодоление лобового сопротивления самолета и на вращение турбин высокого и низкого давления.

С позиций статистической аэродинамики рассмотрим, какая возникает тормозящая сила при посадке самолета АН-24 вследствие полностью выпущенных закрылков. В момент касания взлетной полосы АН-24 имеет скорость 175 км/ч. В этот момент все закрылки выпущены на $\beta = 38$ градусов. Площадь всех закрылок 15 м^2 и расположены симметрично относительно фюзеляжа. Закрылки можно считать плоскими. Тогда в процессе взаимодействия закрылок с набегающим воздухом центробежное воздействие потока можно не учитывать. Результат вычисления дает: $F_x = 5970 \text{ Н} = 608 \text{ кГс}$. Самолет АН-24 испытывает значительную тормозящую силу вследствие воздействия воздушного потока в момент посадки при полностью выпущенных закрылках. Возникающий при этом момент силы опрокидывает самолет по ходу движения.

Для доставки почты в труднодоступные области предлагается использовать беспилотные летательные аппараты. Конкретно в работе [12] рассмотрен БПЛА для почтовой связи. Улучшенный вариант БПЛА для почтовой связи показан на рис. 7.

Размеры летательного аппарата составляют: длина 2,5 м и ширина 3,5 м. Профиль нижнего крыла в качестве прототипа применен Clark-YH-11%, а в качестве прототипа профиля верхнего крыла использовался Clark-YH-14%.

Для верхней поверхности нижнего и верхнего крыла учтено образование срывного течения. Срывное течение учтено также для фюзеляжа, возникающего на боковых поверхностях и на нижней и верхней поверхностях. Использовались два тянувших винта диаметром 1,2 м с мощностью каждого электродвигателя 75 кВт.

Общая конструкция крыльев Clark приведена в таблице.

Для нижней конструкции замкнутого крыла установлены сле-

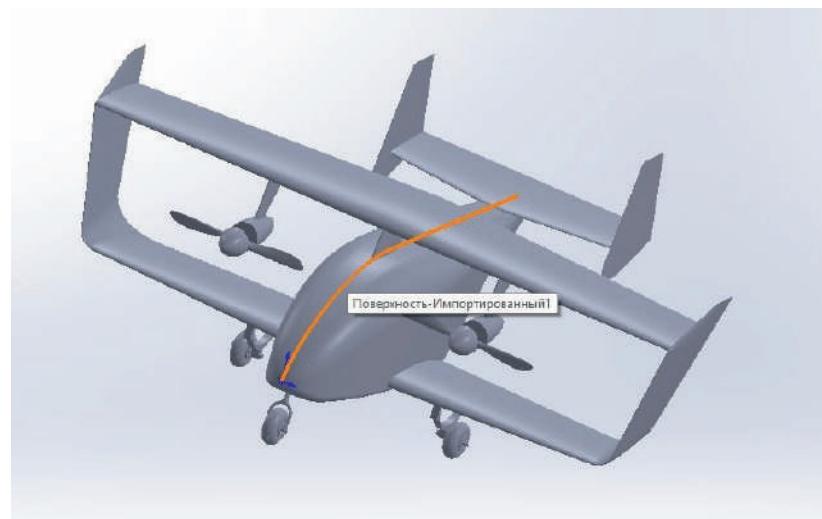


Рис. 7. Общий облик летательного аппарата для почтовой связи

дующие размеры: Общая длина несущей части нижнего крыла $l = 2,1 \text{ м}$ и ширина $h = 0,5 \text{ м}$. Для верхнего крыла следует учитывать отдельно длину крыла, на которую действует поток воздуха, формируемый тянувшими винтами, и длину, на которую этот поток не действует. Толщина и длина лобовой верхней части нижнего крыла определялась в соответствии

с данными профиля крыла Clark-YH – 11% и Clark – YN – 14%. По этим данным производился расчет лобового сопротивления и подъемной силы обоих крыльев. Отдельно был выполнен расчет подъемной силы и лобового сопротивления фюзеляжа. Результаты приведены на рис. 8.

При скорости полета БПЛА 20 м/с (72 км/час) общий полетный

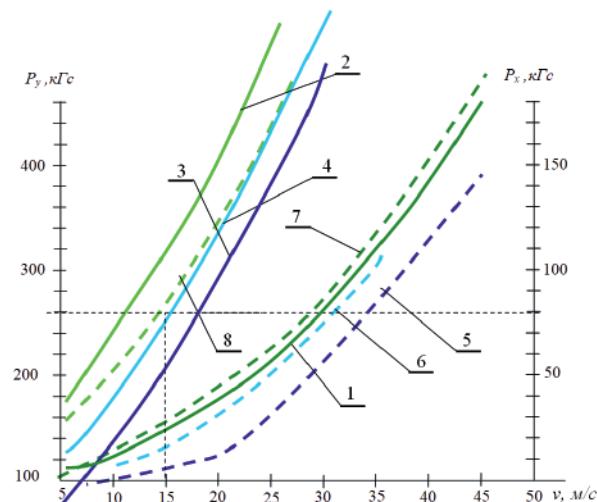


Рис. 8. Подъемная сила и лобовое сопротивление БПЛА для почтовой связи:

- 1 – сила сопротивления ЛА при угле атаки 0° ;
- 2 – сила сопротивления ЛА при угле атаки 15° ;
- 3 – подъемная сила ЛА при угле атаки 0° ;
- 4 – подъемная сила ЛА при угле атаки 15° ;
- 5 – подъемная сила фюзеляжа при угле атаки 0° ;
- 6 – подъемная сила при угле атаки фюзеляжа 15° ;
- 7 – лобовое сопротивление фюзеляжа при угле атаки 0° ;
- 8 – лобовое сопротивление фюзеляжа при угле атаки 15°

вес составляет 295 кГс и может взять на борт до 200 кГ полезного груза.

При угле атаки 0° фюзеляж в основном определяет лобовое сопротивление БПЛА, а при угле атаки 15° наоборот замкнутое крыло БПЛА преимущественно определяет лобовое сопротивление.

На основании проведенных исследований рассмотренный БПЛА вполне может представить интерес в качестве доставки почтовых посылок и корреспонденций в удаленные места со сложным земным ландшафтом. Однако от научного обоснования до практической реализации дистанция огромного размера. Научное обоснование также необходимо развивать, чтобы получить оптимальную конструкцию БПЛА и создать эффективное бортовое энергетическое обеспечение с целью реализации максимального

полетного времени. В этом направлении уже получены предварительные обнадеживающие результаты.

Заключение

Проведенный анализ разных теорий газодинамического обтекания тел сложной формы позволил установить следующее:

1. Разработана статистическая аэродинамика, которая основана на использовании молекулярно-кинетической теории газов и позволила объединить корпускулярную теорию Ньютона и континуальную теорию *g*-Аламбера-Эйлера в единую теорию газодинамического взаимодействия движущегося тела в газовой среде. В результате получены правильные значения лобового сопротивления, подъемной силы крыла самолета,

тяговых усилий винта самолета и мощности работающих газовых турбин.

2. Разработана теория срывного течения, которая позволила уточнить величину лобового сопротивления и подъемной силы крыла самолета, а также теоретически обосновать и экспериментально установить, что врачающиеся лопасти винтов и лопатки турбин являются вихревыми тепловыми насосами.
3. Разработана теория молекулярно-кинетического взаимодействия молекул воздуха с поверхностью летательного аппарата с учетом структурного строения поверхности твердого тела. В результате обоснована общая модель возникновения оледенения винтов и крыльев самолета.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гречихин, Л. И. Современная аэродинамика полета летательных аппаратов и возможности компьютерного моделирования / Л. И. Гречихин // VIII Международная научно-техническая конференция «АВИА-2007»: материалы конф. - Киев: НАУ, 2007. - Т.2. - С. 33-95.
2. Гречихин, Л. И. Аэродинамика летательных аппаратов / Л. И. Гречихин, А. А. Лаптевич, Н. Г. Куць. – Минск: Право и экономика, 2012. – 285 с.
3. Gretchikhin, L. I. Air pressure Force acting on a moving plate / L. I. Gretchikhin // Scientific technical review. – 2014. – № 2. – P. 27-32.
4. Гречихин, Л. И. Влияние срывного течения на лобовое сопротивление шара / Л.И.Гречихин,А.И.Кириленко // Авиационный вестник. – 2019. – № 1. – С. 17-23.
5. Гречихин, Л. И. Возможности использования вихревого теплового насоса на транспорте / Л. И. Гречихин, Н. Г. Куць // Міжвузівський збізник (за галузями знань «Технічні науки»). – Наукові нотатки. – 2018. – В. 62. – С. 78-82.
6. Гречихин, Л. И. Воздушный тепловой насос в ветроэнергетике / Л. И. Гречихин, А. И. Гутковский // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2020. – Т. 63, № 3. – С. 264-284.
7. Кластерная структура кремния и конструкция его поверхности / Л. И. Гречихин [и др.] // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2015. – № 9. – С. 9-16.
8. Лигум, Т. И. Аэродинамика самолета ТУ-134А // Т. И. Лигум. – М.: Транспорт, 1975. – 320 с.
9. Крюков, А. М. Конструкция и летная эксплуатация двигателя Д-30 2сер. / А.М. Крюков. – М.: Воздушный транспорт, 1975. – 198 с.
10. Радченко, И. В. Самолет АН-2 // И. В. Радченко, В. П. Крамчанинов, В. П. Дубринский. – М.: Транспорт, 1974. – 456 с.
11. Шпади, А. Л. Невинтовые пропеллеры / А. Л. Шпади, В. Ф. Тимофеев // Проблемы подготовки специалистов для гражданской авиации: материалы международной научно-практической конференции, 20-21 ноября 2008 года, УВАУ ГА, Ульяновск. – Ульяновск: УВАУ ГА, 2008. – С. 40-43.
12. Гречихин, Л. И. Общие принципы построения почтовой связи с беспилотным летательным аппаратом и с подвижным ретранслятором. / Л. И. Гречихин // Проблемы инфокоммуникаций. – 2017. – №1 (5). – С. 5-12.

REFERENCES

1. Grechikhin, L.I. Modern aerodynamics of flight of aircraft and the possibilities of computer modeling / L.I. Grechikhin // VIII International scientific and technical conference "AVIA-2007": materials of the conf. - Kiev: NAU, 2007. - Vol. 2. - P. 33-95.
2. Grechikhin, L.I. Aerodynamics of aircraft / L.I. Grechikhin, A.A. Laptevich, N.G. Kuts. - Minsk: Law and Economics, 2012. - 285 p.
3. Gretchikhin, L.I. Air pressure Force acting on a moving plate / L.I. Gretchikhin // Scientific technical review. - 2014. - No. 2. - P. 27-32.
4. Grechikhin, L.I. Influence of stall flow on the drag of the ball / L.I. Grechikhin, A.I. Kirilenko // Aviation Bulletin. - 2019. - No. 1. - P. 17-23.
5. Grechikhin, L. I. Possibilities of using a vortex heat pump in transport / L.I. Grechikhin, N.G. Kuts // Mizhvuzsky zbirnik (behind the galuzy knowledge of "Technical science") - Science notes. - 2018. - V. 62. - P. 78-82.
6. Grechikhin, L.I. Air heat pump in wind energy / L.I. Grechikhin, A.I. Gutkovsky // Energetika. Proceedings of higher educational institutions and energy associations of the CIS. - 2020. - Vol. 63, No. 3. - P. 264-284.
7. The cluster structure of silicon and the design of its surface / L.I. Grechikhin [et al] // Strengthening technologies and coatings. - 2015. - No. 9. - P. 9-16.
8. Ligum, T.I. Aerodynamics of the Tu-134A aircraft // T.I. Ligum. - M.: Transport, 1975. - 320 p.
9. Kryukov, A.M. Design and flight operation of the D-30 2ser engine / A.M. Kryukov. - M.: Air transport, 1975. - 198 p.
10. Radchenko, I. V. Aircraft AN-2 // I. V. Radchenko, V. P. Kramchaninov, V. P. Dubrinsky. - M.: Transport, 1974. - 456 p.
11. Shpadi, A.L. Non-screw propellers / A. L. Shpadi, V. F. Timofeev // Problems of training specialists for civil aviation: materials of the international scientific-practical conference, November 20-21, 2008, UVAU GA, Ulyanovsk. - Ulyanovsk: UVAU GA, 2008. - P. 40-43.
12. Grechikhin, L.I. General principles of building postal communication with an unmanned aerial vehicle and a mobile repeater / L.I. Grechikhin // Problems of infocommunications. - 2017. - №1 (5). - P. 5-12.

Статья поступила в редакцию
07.05.2021

УДК 629.735-519

В.А. МАЛКИН, И.В. РОЖКОВ

СИНТЕЗ ИНВАРИАНТНОГО К ПАРАМЕТРИЧЕСКИМ ВОЗМУЩЕНИЯМ КОНТУРА УГОЛОВОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ПО УГЛУ КРЕНА

Виталий Александрович Малкин – доктор технических наук, профессор кафедры авиационных радиоэлектронных систем учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь», Республика Беларусь
vmalkin296@gmail.com

Игорь Владимирович Рожков – магистр технических наук, начальник цикла технической эксплуатации беспилотных авиационных комплексов кафедры беспилотных авиационных комплексов и боевого управления учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
7528972@mail.ru

Vitaly Malkin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Aviation Radioelectronic Systems of the Military Academy of the Republic of Belarus, Republic of Belarus
vmalkin296@gmail.com

Igor Rozhkov – master of technical sciences, head of the cycle of technical operation of unmanned aerial systems of the department of unmanned aerial systems and combat control of the military faculty of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
7528972@mail.ru

Аннотация: в статье рассматривается методика синтеза инвариантной системы автоматической стабилизации беспилотного летательного аппарата по углу крена, базирующаяся на концепции обратных задач динамики. Приводятся методика и результаты имитационного математического моделирования синтезированного контура стабилизации. Представлены результаты сравнительного анализа динамических характеристик контура угловой стабилизации беспилотного летательного аппарата по углу крена с PID-регулятором и синтезированным инвариантным к параметрическим и внешним возмущениям регулятором.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; контур угловой стабилизации; обратные задачи динамики; инвариантный контур угловой стабилизации.

Abstract: the article discusses a technique for synthesizing an invariant system for automatic stabilization of an unmanned aerial vehicle in the roll angle, based on the concept of inverse problems of dynamics. The technique and results of simulation mathematical modeling of the synthesized stabilization loop using the Simulink extension package of the MATLAB program are presented. The results of a comparative analysis of the dynamic characteristics of the angular stabilization loop of an unmanned aerial vehicle in roll angle with a PID controller and a synthesized controller invariant to parametric and external disturbances are presented.

Keywords: unmanned aerial vehicle; corner stabilization circuit; inverse problems of dynamics; invariant contour of angular stabilization.

Основная проблема, возникающая при использовании в контурах стабилизации системы автоматического управления (САУ) беспилотного летательного аппарата (БЛА) регуляторов с постоянными коэффициентами, заключается в нестационарности параметров объекта управления (БЛА) и наличием внешних возмущений. Актуальной задачей является разработка простых и эффективных схем регуляторов, обеспечивающих высокую точность и стабильные динамические характеристики в широком диапазоне изменения параметров объекта управления и внешних возмущений. Продуктивным подходом к решению этой задачи является создание инвариантных к параметрическим и внешним возмущениям регуляторов, синтез которых основан на решении обратных задач динамики. Такие регуляторы должны обеспечить высокое качество и низкую чувствительность (робастность) характеристик переходного процесса в определенном интервале изменения параметров БЛА, а также в условиях внешних стохастических возмущений.

Постановка задачи исследования

В данной работе предлагается рассмотреть методику синтеза инвариантного контура угловой стабилизации БЛА по каналу крена, основанную на концепции обратных задач динамики (ОЗД); проверить качество функционирования и оценить качество переходных процессов контура стабилизации БЛА по каналу тангажа с PID – регулятором и регулятором с предлагаемой структурой в условиях нестационарности параметров объекта управления и внешних стохастических возмущений.

Решение задачи

Методика синтеза инвариантного к параметрическим и внешним возмущениям контура угловой стабилизации БЛА рассматривается в работах [1 – 3].

В общем случае состояние ОУ характеризуется n -мерным вектором X , описываемым стохастическим дифференциальным уравнением:

$$\dot{X} = AX + BU + H\xi \quad (1)$$

где A, B, H – матрицы постоянных коэффициентов соответствующей размерности, U – m -мерный вектор управления, ξ – n -мерный вектор белого шума с известной матрицей интенсивностей.

В процессе управления измеряются все или часть фазовых координат объекта в соответствии с уравнением измерений:

$$Z = CX + \eta, \quad (2)$$

где Z – r -мерный вектор измерений, C – матрица размерности $n \times r$, определяющая измеряемые координаты, η – r -мерный вектор шума измерений с известной матрицей интенсивностей.

В соответствии с принципом ОЗД, оптимальное управление находится в виде такой функции вектора фазовых координат $U(X)$, которая обеспечивает близость фазовых траекторий ОУ и эталонной модели (ЭМ) с заданными динамическими свойствами. Этalonная модель представляет собой детерминированную динамическую систему, описываемую в пространстве состояний n -мерным вектором Y , удовлетворяющим уравнению:

$$\dot{Y} = A_y Y + A^* Y, \quad (3)$$

где A_y, A^* – известные матрицы постоянных коэффициентов, причем элементы матрицы A_y определяют требуемые динамические характеристики ЭМ, Y – вектор, определяющий вынужденное движение ЭМ.

Степень близости фазовых траекторий ОУ и ЭМ будем характеризовать вектором Δ рассогласования их фазовых скоростей:

$$\Delta = \dot{Y} - \dot{X}. \quad (4)$$

Тогда в качестве критерия оптимальности может быть принята квадратичная форма:

$$G(U) = \frac{1}{2} \Delta^T L \Delta, \quad (5)$$

где L – диагональная матрица весовых коэффициентов размерности $n \times n$.

Поскольку квадратичная форма (5) является случайной функцией, для решения задачи оптимизации будем использовать функцию риска:

$$\hat{G}(U) = M_z [G(U)] = \frac{1}{2} M_z (\Delta^T L \Delta), \quad (6)$$

где M_z – операция определения условного математического ожидания.

Рассмотрим физический смысл показателя (6) на примере системы первого порядка. В этом случае скалярное уравнение объекта управления запишем в виде:

$$\dot{x} = ax + bu + h\xi.$$

Уравнение эталонной модели при допущении, что $Y^* = 0$:

$$\dot{y} = ay,$$

тогда рассогласование фазовых скоростей системы и эталонной модели будет равно:

$$\Delta = \dot{y} - \dot{x} = ay - (ax + bu + h\xi).$$

С учетом принятых допущений функция риска будет определяться соотношением:

$$\hat{G}(u) = \frac{1}{2} M_z (\Delta^2) = \frac{1}{2} [a^2 M_z (y - x)^2 + h^2 \sigma_\xi^2 + b^2 u^2 - 2a(y - m_x)bu] \quad (7)$$

где σ_ξ^2 – дисперсия входного случайного процесса ξ ; m_x – математическое ожидание ошибки между выходными величинами системы и эталонной модели.

Оптимальное управление определяется как функция, минимизиру-

ющая $\tilde{G}(u)$. Следовательно:

$$u = \operatorname{argmin} \left[a^2 M_z (y - x)^2 + h^2 \sigma_\xi^2 + b^2 u^2 - 2a(y - m_x)bu \right]$$

Оптимальное управление, минимизирующее функцию (7), находится из уравнения:

$$\frac{d\hat{G}(u)}{du} = 0. \quad (8)$$

Решая уравнение (8), получим:

$$u_{\text{optm.}} = \frac{am_\Delta}{b^2},$$

где $m_\Delta = y - m_x$.

Подставляя (8) в (7), получаем минимальное значение показателя $\tilde{G}(u)$:

$$\hat{G}(u_{\text{optm.}}) = \frac{a^2(b-1)^2}{b^2} m_\Delta^2 + a^2 \sigma_\eta^2 + h^2 \sigma_\xi^2. \quad (9)$$

Минимум выражения (9) эквивалентен минимуму величины $\frac{a^2(b-1)^2}{b^2} m_\Delta^2 + a^2 \sigma_\eta^2$. Таким образом, оптимальное управление обеспечивает минимум средневзвешенного значения математического ожидания ошибки и ее дисперсии (при $b >> 1$ получаем выражение $a^2(m_\Delta^2 + \sigma_\eta^2)$).

Оптимальный вектор управления U находится путем решения задачи локальной оптимизации. Это значит, что вектор управления должен удовлетворять дифференциальному уравнению:

$$\dot{U} = -P \left[\operatorname{grad}\hat{G}(U) \right]^T. \quad (10)$$

где $\operatorname{grad}\hat{G}(U) = \left(\frac{d\hat{G}}{du_1}, \frac{d\hat{G}}{du_2}, \dots, \frac{d\hat{G}}{du_m} \right)^T$, P – диагональная матрица весовых коэффициентов размером $n \times m$.

С учетом соотношений (4) и (6), получим выражение для вектора градиента функции риска:

$$\operatorname{grad}\hat{G}(U) = \left(\frac{d\hat{G}}{dU} \right)^T = M_z \left(\Delta^T L \frac{d\Delta}{dU} \right)^T = -M_z (\Delta^T LB)^T$$

Тогда уравнение для \dot{U} будет иметь вид:

$$\dot{U} = PM_z (\Delta^T LB)^T = PB^T L^T M_z (\Delta). \quad (11)$$

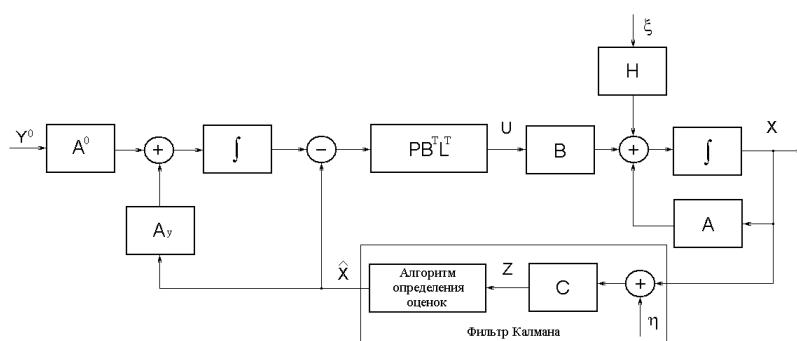


Рис. 1. Структурная схема оптимальной системы стабилизации:
A, B, H – матрицы постоянных коэффициентов соответствующей размерности;
U – m-мерный вектор управления;
 ξ – n-мерный вектор белого шума с известной матрицей интенсивностей;
C – матрица размерности $n \times r$, определяющая измеряемые координаты;
Z – r-мерный вектор измерений;
 ζ – r-мерный вектор шума измерений с известной матрицей интенсивностей

Проинтегрировав обе части уравнения (11) по времени, с учетом соотношения (3), окончательно получим:

$$\begin{aligned} U &= PB^T L^T M_z \left[\int \Delta dt \right] = \\ &= PB^T L^T M_z \left[\int \dot{Y} dt - \hat{X} \right] = \\ &= PB^T L^T \left[\int (A_y Y + A^0 Y^0) dt - \hat{X} \right] \end{aligned} \quad (12)$$

где $\hat{X} = M_z(X)$ – условное математическое ожидание вектора состояния, которое может быть получено путем использования фильтра Калмана.

С учетом близости фазовых траекторий ОУ и ЭМ в уравнении (12) вместо Y можно приближенно использовать \hat{X} . Такая замена позволяет получить вектор управления в виде обратной связи:

$$U = PB^T L^T \left[\int (A_y \hat{X} + A^0 Y^0) dt - \hat{X} \right] \quad (13)$$

С учетом выражения (13), структурная схема оптимальной системы стабилизации будет иметь вид, представленный на рис. 1.

Таким образом, в соответствии с теоремой разделения задача оптимального управления системой стабилизации для линейной модели ОУ распадается на две подзадачи: задачу построения оптимальной оценки вектора состояния системы (фильтр Калмана) и задачу синтеза оптимального регулятора, реализующего закон управления в форме (13).

Структурная схема, приведенная на рис. 1, определяет общий вид инвариантного к параметрическим и внешним возмущениям контура угловой стабилизации БЛА. С учетом конкретных соотношений для моделей объекта управления, вектора измерений и эталонной модели в дальнейшем могут быть получены структура и параметры контуров стабилизации по каналам тангажа и крена.

Рассмотрим структуру контура стабилизации БЛА по углу крена.

Контур стабилизации и управления БЛА по углу крена предназначен для парирования случайных возмущений и отработки с заданным качеством регулярных управляемых воздействий по углу крена. Контур стабилизации по крену является внутренним контуром в канале управления боковым движением БЛА.

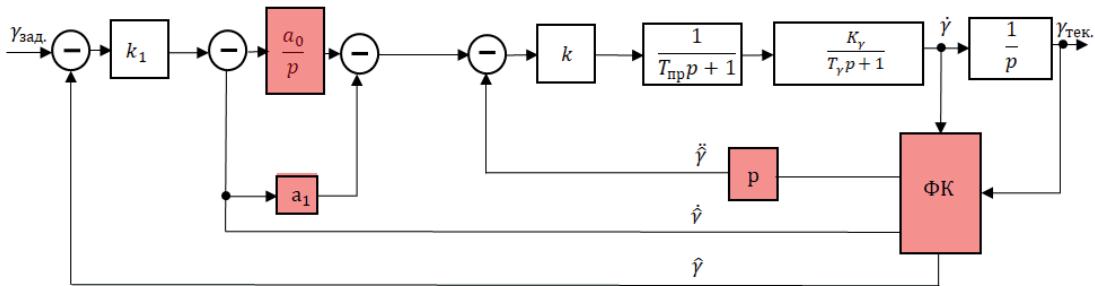


Рис. 2. Структурная схема инвариантного контура стабилизации по крену

Передаточная функция БЛА по каналу крена описывается выражением:

$$W_\delta(p) = \frac{K_\gamma}{p(T_\gamma p + 1)}, \quad (14)$$

где K_γ — коэффициент передачи БЛА по каналу крена; T_γ — постоянная времени канала крена.

Предполагается, что параметры K_γ , T_γ могут изменяться в процессе функционирования БЛА. Необходимо синтезировать закон управления, обеспечивающий требуемое качество переходного и устанавлившегося режимов в некотором диапазоне изменения параметров K_γ и T_γ .

Структура и параметры регулятора выбираются таким образом, чтобы на выходе апериодического звена $\frac{K_\gamma}{T_\gamma p + 1}$ формировался такой же сигнал, как и на выходе эталонной модели, в качестве которой в данном случае принимается система 2 порядка:

$$\ddot{\gamma} + a_1\dot{\gamma} + a_0\gamma = a_0\Delta\gamma',$$

где $\Delta\gamma' = k_1\Delta\gamma$.

Коэффициенты модели a_0 и a_1 выбираются таким образом, чтобы обеспечить требуемое качество переходного процесса в контуре стабилизации. Коэффициент $a_0 = \omega_0^2$ определяет скорость пр отекания переходного процесса, коэффициент $a_1 = 1,73\omega_0$ влияет на величину перерегулирования и скорость затухания колебаний в контуре.

Коэффициент k_1 выбирается исходя из требуемого значения добротности по скорости.

Выражение для искомой функции управления будет иметь вид:

$$\begin{aligned} u &= k(\dot{\gamma} - \ddot{\gamma}) = k\{a_0k_1 \int \Delta\gamma dt - a_1\dot{\gamma} - a_0 \int \dot{\gamma} dt - \ddot{\gamma}\} = \\ &= k\{a_0 \int (k_1\Delta\gamma - \ddot{\gamma}) dt - a_1\dot{\gamma} - \ddot{\gamma}\} \end{aligned} \quad (15)$$

Структурная схема инвариантного контура стабилизации и управления по крену представлена на рис. 2.

Постоянная времени замкнутого контура рулевого привода определяется значением добротности $T_{np} = (K_{np})^{-1}$. Передаточная функция рулевого привода без учета ограничений имеет вид:

$$W_{np}(p) = \frac{1}{T_{np}p + 1} \quad (16)$$

Передаточная функция разомкнутой части системы, представленной на рис. 2, при условии $T_{np} = 0$:

$$W_p(p) = \frac{a_0^2 k k_\gamma}{a_0(T_\gamma + K K_\gamma)p^2 + a_0[1 + a_1 K K_\gamma]p + a_0^2 K K_\gamma} \quad (17)$$

При выполнении условий $kk_\gamma \gg T_\gamma$ и $a_1kk_\gamma \gg 1$ передаточная функция (17) принимает вид $W_p(p) = \frac{a_0}{p^2 + a_1p + a_0}$, что соответствует передаточной функции модели системы.

Таким образом, за счет обратных связей по угловой скорости $\dot{\gamma}$ и угловому ускорению $\ddot{\gamma}$ удается обеспечить инвариантность контура стабилизации по крену к изменению параметров объекта управления K_γ и T_γ .

Рассмотрим методику синтеза алгоритма фильтра Калмана для контура угловой стабилизации по каналу крена.

Уравнение линейной динамической системы записывается в виде [4]:

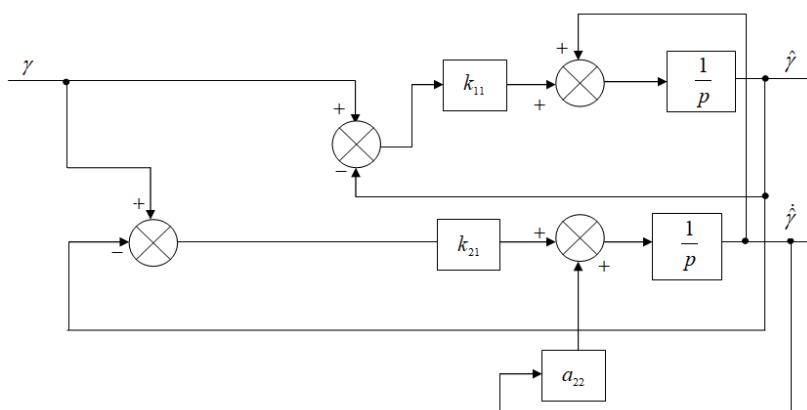


Рис. 3. Структурная схема фильтра Калмана для системы угловой стабилизации БЛА по каналу крена

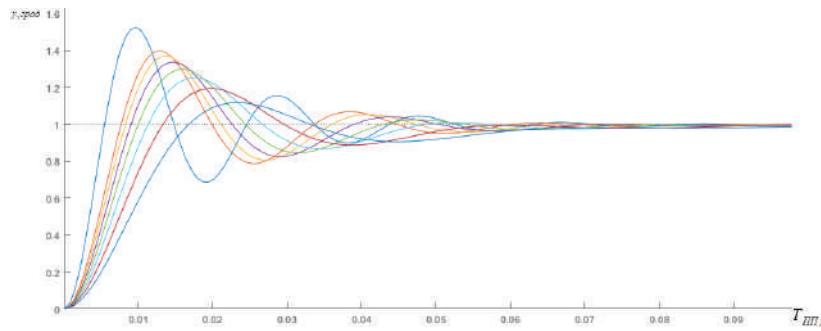


Рис. 4. Графики переходных процессов при отработке единичного ступенчатого воздействия и вариации параметра K_γ

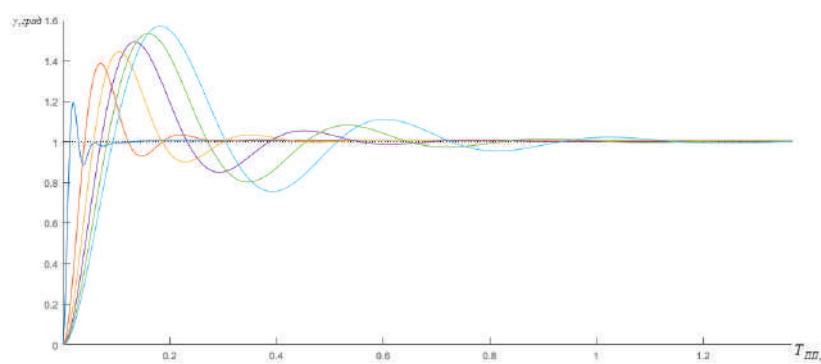


Рис. 5. Графики переходных процессов при отработке единичного ступенчатого воздействия и вариации параметра T_γ

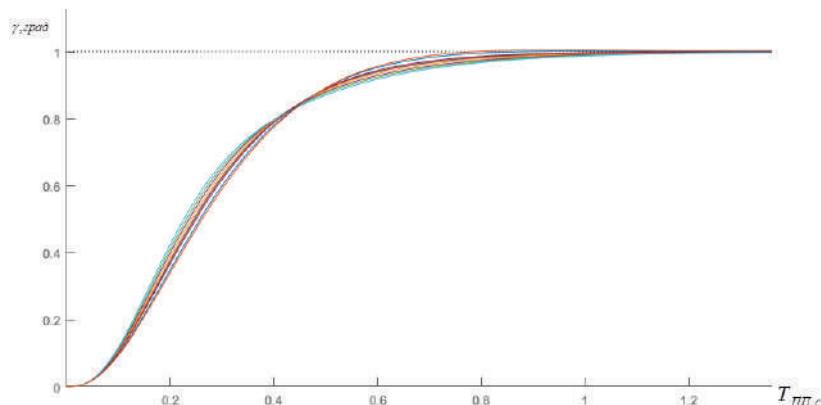


Рис. 6. Графики переходных процессов при отработке единичного ступенчатого воздействия и вариации параметров K_γ и T_γ

$$\dot{X} = AX + G\xi, \quad (18)$$

где A — матрица состояния системы (определяется коэффициентами БЛА), X — вектор состояния системы, G — матрица интенсивностей порождающего шума системы ξ .

Уравнение системы в пространстве состояний для составляющих вектора состояния системы $X = (\gamma, \dot{\gamma})^T = (x_1, x_2)^T$ имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2; \\ \dot{x}_2 = -x_2 \frac{1}{T_\gamma} + \frac{K_\gamma}{T_\gamma}. \end{cases} \quad (19)$$

Из уравнений (19) следует, что матрица состояния системы A запишется как:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{T_\gamma} \end{pmatrix} \quad (20)$$

где T_γ — постоянная времени отработки угла крена.

Для вектора порождающих шумов $\xi = (0, \xi)^T$ матрица интенсивностей будет иметь вид:

$$G = \begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{pmatrix} \quad (21)$$

Для вектора измерений $Z = (\gamma_0)^T$ матрица измерений может быть представлена в форме:

$$C = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (22)$$

Ковариационная матрица шумов измерений имеет вид:

$$Q = (q), Q^{-1} = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \end{pmatrix} \quad (23)$$

Система уравнений Риккати в скалярной форме:

$$\begin{cases} \dot{r}_{11} = r_{21} + r_{12} - \frac{r_{11}^2}{q} + g_{11}; \\ \dot{r}_{12} = r_{22} + r_{12}a_{22} - \frac{r_{11}r_{12}}{q} + g_{12}; \\ \dot{r}_{21} = a_{22}r_{21} + r_{22} - \frac{r_{21}r_{11}}{q} + g_{21}; \\ \dot{r}_{22} = a_{22}r_{22} + a_{22}r_{21} - \frac{r_{21}r_{12}}{q} + g_{22} \end{cases} \quad (24)$$

С учетом того, что ($r_{12} = r_{22} = 0$), система уравнений (24) принимает вид:

$$\begin{cases} \dot{r}_{11} = r_{21} - \frac{r_{11}^2}{q} + g_{11}; \\ \dot{r}_{21} = a_{22}r_{21} - \frac{r_{21}r_{11}}{q} + g_{21}. \end{cases} \quad (25)$$

Коэффициенты фильтра Калмана определяются как:

$$k_{11} = r_{11}/q; k_{21} = r_{21}/q. \quad (26)$$

Система уравнений для оценок фазовых координат будет иметь вид:

$$\begin{cases} \hat{\gamma} = \hat{\gamma} + k_{11}(\gamma - \hat{\gamma}); \\ \dot{\hat{\gamma}} = a_{22}\hat{\gamma} + k_{21}(\gamma - \hat{\gamma}). \end{cases} \quad (27)$$

Структурная схема, соответствующая системе уравнений (27) представлена на рис. 3.

Проверка качества функционирования контура стабилизации БЛА по углу крена проводилась путем компьютерного моделирования

с использованием пакета прикладных программ для решения задач технических вычислений [5].

В математической модели БЛА предусмотрена возможность оперативного изменения коэффициентов K_γ , T_γ . Методика проведения экспериментов заключается в определении зависимости характеристик переходного процесса (длительность $T_{пп}$ и перерегулирование σ) в зависимости от вариации параметров ОУ при использовании *PID* – регулятора и синтезированного регулятора. Изменение параметров ОУ приводится в относительных единицах – процентах от их номинальных значений. За номинальные значения параметров БЛА по углу крена приняты [2]:

$$T_\gamma = 0,05 \text{ с}, K_\gamma = 25.$$

Результаты имитационного математического моделирования (ИММ) для контура стабилизации угла крена с *PID* – регулятором представлены в таблице 1.

Графики переходных процессов для контура стабилизации угла крена с *PID* – регулятором и вариации параметров БЛА представлены на рис. 4 и 5.

Результаты ИММ для контура стабилизации угла крена с синтезированным инвариантным регулятором представлены в таблице 2.

Графики переходных процессов для контура стабилизации угла крена с синтезированным инвариантным регулятором и вариации параметров БЛА представлены на рис. 6.

Заключение

По результатам, представленным в статье, можно сделать следующие выводы:

- постоянное входное воздействие отрабатывается контуром угловой стабилизации по крену с нулевой статической ошибкой;
- качество переходного процесса в контуре угловой стабилизации по крену с предложенной схемой регулятора остается высоким ($\sigma < 1\%$, $T_{пп} = 0,6 \div 0,7 \text{ с}$) при вариациях параметров БЛА в диапазоне: K_γ – от 25 % до 250 %, T_γ – от 20 % до 1800 %

Таблица 1. Результаты ИММ при отработке единичного ступенчатого воздействия и вариации параметров объекта управления (для *PID* – регулятора)

K_γ	$T_{пп} \text{ с}$	$\sigma, \%$	$T_\gamma \text{ с}$	$T_{пп} \text{ с}$	$\sigma, \%$
5	0,12	3,22	0,01	0,05	19
10	0,07	1,66	0,11	0,16	38,6
15	0,04	11,7	0,21	0,22	44
20	0,03	19	0,31	0,47	49,1
25	0,04	25	0,41	0,59	53,3
20	0,04	29,8	0,51	0,68	57
35	0,042	36,9	0,61	0,72	59
40	0,42	37	0,71	0,85	63
45	0,041	39,7	0,81	1,23	65
50	0,42	52	0,91	1,48	67

Таблица 2. Результаты ИММ при отработке единичного ступенчатого воздействия, вариации параметров объекта управления для синтезированного инвариантного регулятора

K_γ	$T_{пп} \text{ с}$	$\sigma, \%$	$T_\gamma \text{ с}$	$T_{пп} \text{ с}$	$\sigma, \%$
5	0,59	0,16	0,01	0,59	0,16
10	0,6	0,18	0,11	0,6	0,18
15	0,61	0,19	0,21	0,61	0,19
20	0,63	0,17	0,31	0,63	0,17
25	0,64	0,15	0,41	0,64	0,15
20	0,67	0,22	0,51	0,67	0,22
35	0,69	0,35	0,61	0,69	0,35
40	0,7	0,45	0,71	0,7	0,45
45	0,71	0,4	0,81	0,71	0,4
50	0,7	0,37	0,91	0,7	0,37

от номинальных значений. Для классического *PID* – регулятора качество переходного процесса существенно снижается (при увеличении K_γ в 1,25 раза от номинального значения, $\sigma > 25\%$, при увеличении T_γ в 2 раза от номинального значе-

- ния, $\sigma > 39\%$);
- уровень флюктуационной составляющей сигнала на выходе контура стабилизации с предлагаемой схемой регулятора на порядок ниже, чем у классического *PID* – регулятора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Малкин, В.А. Статистический синтез робастной системы угловой стабилизации беспилотного летательного аппарата / В.А. Малкин, И.В. Рожков // Сборник докладов международной научно-практической конференции MILEX-2014, Минск, 9-12 июля 2014 г. / изд. Бел ИСА. – Минск, 2014. – С. 113-118.
2. Микросистемы ориентации беспилотных летательных аппаратов / Под ред. В. Я. Распопова. – М.: Машиностроение, 2011. – 184 с.
3. Рожков, И.В. Синтез инвариантного контура угловой стабилизации беспилотного летательного аппарата по углу тангенса / И.В. Рожков // Системный анализ и прикладная информатика. – 2020. – № 3. – С. 14–20.
4. Рожков, И.В. Синтез фильтра Калмана для системы угловой стабилизации беспилотного летательного аппарата / В.А. Малкин, И.В. Рожков // Вестник Военной академии Республики Беларусь. – 2020. – № 2. – С. 14–21.
5. Щербаков, В.С. Основы моделирования систем автоматического регулирования и электротехнических систем в среде Matlab Simulink: учебное пособие / В.С. Щербаков, А.А. Руппель, В.А. Глушец. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2003. – 160 с.

REFERENCES

1. Malkin, V.A. Statistical synthesis of a robust system of angular stabilization of an unmanned aerial vehicle / V.A. Malkin, I. V. Rozhkov // Collection of reports of the international scientific-practical conference MILEX-2014, Minsk, July 9-12, 2014 / ed. Bel ISA. – Minsk, 2014. – P. 113-118.
2. Microsystems of orientation of unmanned aerial vehicles / Ed. V.Ya. Raspopov. – M.: Mashinostroenie, 2011 . – 184 p.
3. Rozhkov, I.V. Synthesis of an invariant contour of angular stabilization of an unmanned aerial vehicle in pitch angle / I.V. Rozhkov // System Analysis and Applied Informatics. – 2020. – No. 3. – P. 14–20.
4. Rozhkov, I.V. Synthesis of the Kalman filter for the angular stabilization system of an unmanned aerial vehicle / V.A. Malkin, I. V. Rozhkov // Bulletin of the Military Academy of the Republic of Belarus. – 2020. – No. 2. – P. 14–21.
5. Shcherbakov, V.S. Fundamentals of modeling automatic control systems and electrical systems in the Matlab Simulink environment: a tutorial / V.S. Shcherbakov, A.A. Ruppel, V.A. Glushev. – Omsk: Publishing house SibADI, 2003. – 160 p.

*Статья поступила в редакцию
05.05.2021*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ИСТОЧНИКА РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ГРУППОЙ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Андрей Павлович Кульпанович – кандидат технических наук, доцент, проректор по государственной авиации – начальник военного факультета учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
ladakulp@rambler.ru

Andrey Kulpanovich – Candidate of Technical Science, associate professor, Vice-Rector for State Aviation – Head of the Military Faculty of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
ladakulp@rambler.ru

Александр Григорьевич Боровой – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
baravoi_aliaksandr@mail.ru

Alexander Borovoy – Candidate of Technical Science, leading researcher of the research laboratory of the military faculty of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
baravoi_aliaksandr@mail.ru

Константин Иванович Якута – курсант учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
emlovan11@gmail.com

Konstantin Yakuta – cadet of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
emlovan11@gmail.com

Аннотация: предложено использование векторно-алгебраического решения задачи определения координат источника радиоизлучения группой беспилотных летательных аппаратов по разностно- дальномерной информации. Такое решение не налагает ограничений на максимальное количество и траекторию полета беспилотных летательных аппаратов. Проведен сравнительный анализ точности определения декартовых координат объекта с использованием данного алгоритма и метода наиболее точного измерения.

Ключевые слова: разностно-дальномерная система, измерительные позиции, декартовые координаты, избыточность измерений.

Abstract: it is proposed to use a vector-algebraic solution to the problem of determining the coordinates of a radio emission source by a group of unmanned aerial vehicles using differential-rangefinder information. This solution does not impose restrictions on the maximum number and flight trajectory of unmanned aerial vehicles. A comparative analysis of the accuracy of determining the Cartesian coordinates of an object using this algorithm and the method of the most accurate measurement is carried out.

Keywords: differential-rangefinder system, measuring positions, Cartesian coordinates, redundancy of measurements.

Активное использование в вооруженных конфликтах последних десятилетий беспилотных летательных аппаратов (БЛА) непосредственно связано с их высокой боевой эффективностью при относительно невысокой стоимости. Одной из основных боевых задач решаемой БЛА является обнаружение и огневое поражение вражеских объектов. При этом одним из способов повышения вероятности выполнения поставленной задачи является действия БЛА группе. Данный тактический прием позволяет рассматривать группу БЛА как многопозиционную систему, что открывает дополнительные возможности по обнаружению, определению местоположения и уничтожению вражеских объектов. В данной работе будет рассматриваться только задача определения местоположения.

Источником информации о местоположении вражеских объектов может являться радиоизлучение, что обусловлено использованием на большинстве образцов вооружения и военной техники радиоэлектронного оборудования. При решении задачи определения местоположения источника радиоизлучения (ИРИ) группой состоящей из нескольких БЛА возникает множество задач основной из которых является определение типа первичной измеряемой информации, которая, как правило, для пассивных систем, является угломерная либо разностно-дальномерная. Предлагается использовать разностно-дальномерную информацию, поскольку измерение направления на ИРИ сопряжено со сложностями создания широколосных пеленгаторов высокой точности в условиях жестких масштабаритных ограничений.

Анализ существующих методов определения координат объектов в разностно-дальномерных системах

Разностно-дальномерная система (РДС), как следует из названия, позволяет определить координаты объекта (ИРИ) путем измерения разностей расстояний от него до различных измерительных позиций (ИП) под которыми понимаются БЛА. Существующие алгоритмы позволяют определять координаты

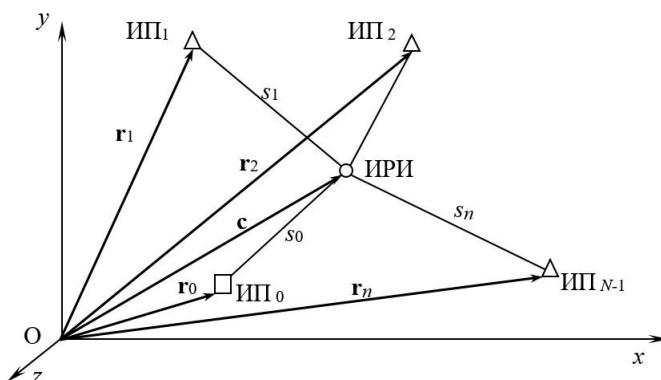


Рис. 1. Геометрия задачи определения координат ИРИ группой БЛА

объектов, однако существенная нелинейность их функциональной зависимости от первичных измеряемых параметров (разностей дальностей) приводит к использованию, как правило, симметричного расположения ИП входящих в состав РДС [1, 2].

Одновременно важной задачей является повышение точности РДС за счет использования избыточности первичных измеряемых параметров. Для этого наиболее широко применяются два подхода. Первый основан на решении математически формализованной задачи методом максимума правдоподобия. При этом проблема нелинейности уравнений, связывающих координаты цели с первичными измеряемыми параметрами, преодолевается путем линеаризации нелинейных соотношений [3]. Второй подход, итеративный, также использует линейную аппроксимацию и заключается в сведении решения системы нелинейных алгебраических уравнений к задаче минимизации функций способом последовательных приближений [4, 5].

Анализ существующих подходов к решению задач определения координат объекта в РДС позволяет выделить их принципиальные недостатки:

- необходимость линеаризации исходных уравнений связи, что приводит к смещению конечных оценок определения местоположения;
- существенная зависимость точности получаемых оценок координат от степени соответствия допущений о гауссовском распределении ошибок

первичных измерений и известности их корреляционной матрицы;

- необходимость использования сложных вычислительных процедур, связанных с нахождением частных производных от трансцендентных функций;
- наложение ограничений на геометрию расположения ИП для упрощения конечных аналитических выражений.

Следует отметить, что указанные недостатки в достаточной степени освещены [1, 3, 4, 6], однако при этом способы снижения их негативного влияния всегда носят частный характер и приводят, как правило, либо к сужению рабочей зоны измерительной системы, либо к применению громоздких вычислительных алгоритмов.

Совокупность факторов, существенно усложняющих решение задачи определения координат объектов в РДС классическими способами, приводит к необходимости синтеза алгоритмов оценивания, направленных на получение обобщенных решений и оптимизированных, как с точки зрения точности получаемых оценок, так и по сложности вычислительных процедур.

Постановка задачи

Рассмотрим РДС, состоящую из N ИП, образующих $(N - 1)$ измерительных баз (рис. 1). Координаты ИП (известны априорно) задаются в прямоугольной ортодромической системе координат линейно независимыми радиус-векторами $r_n = [x_n \ y_n \ z_n]^T$, $n = 0 \dots (N - 1)$. Местоположение

ИРИ определяется радиус-вектором $c = [x_c \ y_c \ z_c]^T$. На рис. 1 базовая ИП (относительно которой рассчитываются значения разности-дальностей) обозначается квадратом.

Подробное аналитическое решение поставленной выше задачи представлено в [5], однако не представлено сравнение с уже существующими алгоритмами определения координат.

Требуется провести сравнительный анализ решения представлена в [5] с существующими алгоритмами определения координат в РДС.

Решение задачи

Одним из основных параметров характеризующих, функционирование РДС является точность определения местоположения объекта (ИРИ) в РДС. Большинство существующих подходов не позволяют решить проблему неоднозначности для произвольного расположения ИП. В этой связи вводится допущение о ее заведомом решении. Сравнение результатов работы РДС рассматривается на плоскости для упрощения визуализации. Для сравнительного анализа точностных характеристик представленного в [7] решения используется метод наиболее точного измерения. Суть данного метода заключается в следующем:

- избыточная система разбивается на несколько без избыточных подсистем;
- рассчитывается точность (среднеквадратическая ошибка) получения оценок местоположения в каждой из подсистем [4]:

$$\sigma_{lmm} = \sqrt{\frac{\sigma_{\Delta r_{0n}}^2 + \sigma_{\Delta r_{0m}}^2}{\sin \psi_{0n}}}, \quad (1)$$

где ψ_{0n} — угол, под которым видна база системы;

$\sigma_{\Delta r_{0n}}$ — среднеквадратическая ошибка определения линии положения, образованной базовой и n -й ИП;

$\sigma_{\Delta r_{0m}}$ — среднеквадратическая ошибка определения линии положения, образованной базовой и m -й ИП;

ошибка системы определения местоположения принимается равной минимальному из полученных значений для каждой из подсистем.

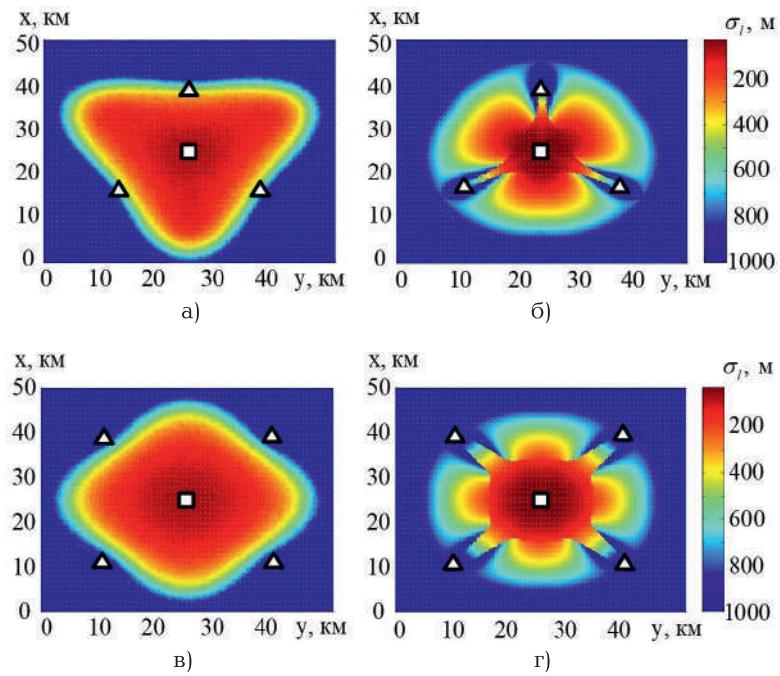


Рис. 2. Рабочие зоны разностно-дальномерных систем с различной геометрией и количеством измерительных пунктов:
а, в – синтезированный алгоритм; б, г – метод наиболее точного измерения;

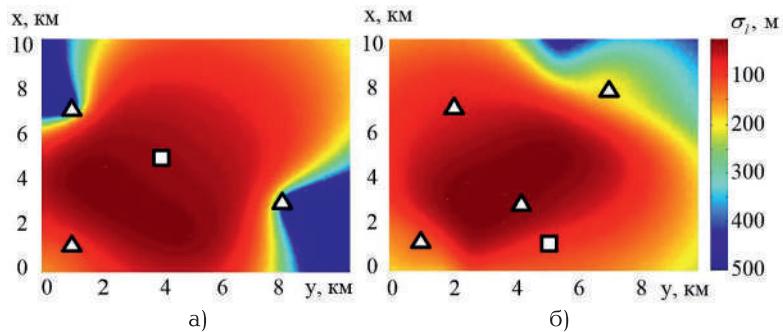


Рис. 3. Рабочие зоны разностно-дальномерных систем со сложной геометрией:
а – три измерительные позиции; б – четыре измерительные позиции

Эта последовательность действий повторяется для каждой точки заданного участка пространства.

Результаты моделирования

На рис. 2 и 3 представлены рабочие зоны РДС, в которой четыре и пять ИП. Под рабочей зоной понимается участок пространства, в котором точность определения местоположения не менее заданной.

Моделируемый участок пространства размером 50×50 км (10×10 км) разбивается на 1000×1000 точек, для каждой из которых на основе измеренных значений разностей дальностей ($\sigma_{\Delta r_{0n}} = \sigma_{\Delta r_{0m}} = 30$ м) и исходя из геометрии их взаимного расположения рассчитываются значения среднеквадратической ошибки определения местоположения ИРИ:

$$\sigma_l = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}. \quad (2)$$

Значительным преимуществом решения [5] является не только возможность построения, но и анализа рабочей зоны многопозиционной

системы со сложной геометрией расположения измерительных позиций (рис. 3).

Как показывают результаты моделирования, изменение взаимного расположения ИП относительно опорного приводит к вполне ожидаемым существенным изменениям конфигурации рабочей зоны. В свою очередь появление избыточности измерений обеспечивает повышение точности определения местоположения. Так, например, добавление одного дополнительного ИП расширяет зону высокой точности определения местоположения на несколько десятков процентов (в зависимости от геометрии системы). При этом взаимосвязь линейной ошибки определения местоположения от количества ИП имеет вид экспоненциально убывающей функции и говорит о нецелесообразности применения более шести ИП.

Заключение

Таким образом, представленное в [7] решение задачи определения декартовых координат ИРИ в РДС по сравнению с методом наиболее точного измерения характеризуется более высокой точностью и отсутствием ограничений на геометрию расположения ИП. Это в свою очередь значительно снижает требования к траектории полета БЛА при определении декартовых координат ИРИ и не накладывает ограничений на максимальное количество БЛА в группе.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ширман, Я.Д. Теоретические основы радиолокации / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Советское радио, 1970. – 560 с.
2. Степанов, А.О. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации / А.О. Степанов. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор», 2010. – Часть 1. Введение в теорию оценивания. – 509 с.
3. Дмитренко, А.А. Минимизация сектора обзора по разности времен запаздывания в корреляционно-базовых системах обнаружения источников радиоизлучения с псевдообзором по азимуту / А.А. Дмитренко, С.Ю. Седышев // Вестник Полоцкого государственного университета. – 2014. – № 4. – С. 85-88.
4. Черняк, В. С. Многопозиционная радиолокация / В. С. Черняк. – М.: Радио и связь, 1993. – 415 с.
5. Уоткинс, Д. Основы матричных вычислений / Д. Уоткинс – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 664 с.
6. Lee, S. C. TDOA based UAV Localization using Dual-EKF Algorithm / S. C. Lee, W. R. Lee, K. H. You // International Journal of Control and Automation. – 2009. – Vol.2, No.4. – P. 35-42.
7. Боровой, А.Г. Векторно-алгебраическое решение задачи определения координат объекта в разностно- дальнометрической радиотехнической системе / А.Г. Боровой, С.Б. Калитин, А.В. Шарамет // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2013. – № 2 (39). – С. 79-83.

REFERENCES

1. Shirman, Ya.D. Theoretical Foundations of Radar / Ed. POISON. Shirman. Textbook for universities. – M., 1970. – 560 p.
2. Stepanov, A.O. Foundations of the theory of estimation with applications to the problems of processing navigation information. Part 1. Introduction to the theory of estimation / A.O. Stepanov. – SPb .: State Scientific Center of the Russian Federation OJSC "Concern TsNII" Elektropribor ", 2010. – 509 p.
3. Dmitrenko, A.A. Minimization of the survey sector by the difference in delay times in correlation-base systems for detecting radio emission sources with pseudo-survey in azimuth / A.A. Dmitrenko, S.Yu. Syedyshev // Bulletin of Polotsk State University. – 2014. – No. 4. – P. 85-88.
4. Chernyak, VS Multiposition radar / VS Chernyak. – M.: Radio and communication, 1993. – 415 p.
5. Watkins, D. Fundamentals of matrix computations / D. Watkins – M.: BINOM. Knowledge laboratory, 2006. – 664 p.
6. Lee, S. C. TDOA based UAV Localization using Dual-EKF Algorithm / S. C. Lee, W. R. Lee, K. H. You // International Journal of Control and Automation. December 2009. – Vol.2, No.4. – P. 35-42.
7. Borovoy, A.G. Vector-algebraic solution of the problem of determining the coordinates of an object in a differential-rangefinder radio engineering system / A.G. Borovoy, S.B. Kalitin, A.V. Sharamet // Vestn. Military. acad. Rep. Belarus. – 2013. – No. 2 (39). – P. 79-83.

Статья поступила в редакцию
10.03.2021

ПРОТИВООБЛЕДЕНИТЕЛЬНЫЕ ЖИДКОСТИ В ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

Артем Артюрович Шегидевич – кандидат технических наук, ректор учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
sh.a.bgaa@tut.by

Анна Анатольевна Жукова – кандидат технических наук, проректор по научной работе учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
hannazhukova@mail.ru

Дмитрий Юриевич Щербунов – магистр технических наук, аспирант учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
dmitry.shcherbunov@icloud.com

Виталий Алексеевич Котович – курсант учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
vitkots@mail.ru

Artem Shegidevich – Candidate of Technical Sciences, Rector of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
sh.a.bgaa@tut.by

Hanna Zhukova – Candidate of Technical Sciences, vice-rector for scientific work of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
hannazhukova@mail.ru

Dmitry Shcherbunov – master of technical sciences, postgraduate student of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
dmitry.shcherbunov@icloud.com

Vitaly Kotovich – cadet of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
vitkots@mail.ru

Аннотация: работа посвящена анализу противообледенительных жидкостей. Рассмотрены основные компоненты противообледенительных жидкостей, обоснован их оптимальный состав. Показана эффективность применения комплексных составов ингибиторов для снижения коррозии конструкционных элементов обрабатываемых ПОЖ поверхностей.

Ключевые слова: воздушное судно, безопасность полётов, снежно-ледяные отложения, время защитного действия, химический состав, ПОЖ.

Abstract: the paper is devoted to the analysis of anti-icing fluids. The main components of anti-icing fluids are considered, their optimal composition is substantiated. The effectiveness of the use of complex compositions of inhibitors to reduce the corrosion of structural elements of the surfaces treated with the SLF is shown.

Keywords: aircraft, flight safety, snow and ice deposits, time of protective action, chemical composition, AIF.

Сегодня авиационная промышленность является передовой отраслью по многим направлениям. Во-первых, это наиболее удобный и быстрый вид транспорта (пассажиро- и грузоперевозки). Во-вторых, это область по применению передовых и инновационных разработок (нейронные сети, разработка новых легковесных и износостойких материалов, превосходящих по

характеристикам углеродные композиты, новые экологические виды топлива («зелёный авиационный дизель» и т.д.). В-третьих, высококвалифицированный элитный персонал (пилоты, бортпроводники, диспетчеры и т.д.).

Место гражданской авиации в лидирующих позициях по многим направлениям связано с обеспечением комфортных и безопасных условий для пассажиров. Поэтому

находясь в любом аэропорту можно заметить, что это один большой организм, где каждый выполняет определённый вид качественной и точной работы.

Одним из таких направлений работ является противообледенительная обработка воздушных судов (ВС).

Противообледенительная обработка (ПОО) осуществляется для удаления и предотвращения

обледенения ВС на земле и создания защитной противообледенительной плёнки. Это позволяет остановить на ограниченное время процесс образования снежно-ледяных отложений на несущих аэродинамических поверхностях ВС и осуществить его безопасный взлёт [1]. Набегающий поток воздуха, содержащий мельчайшие капли воды в переохлажденном состоянии, сталкивается со сравнительно теплыми поверхностями самолёта, в результате чего происходит кристаллизация переохлажденных капель дождя, тумана или морози. Наледь может образовываться и при сублимации пара в лед с образованием инея, твердого наледи и изморози. Наземное обледенение поверхностей самолёта возможно при замерзании обычной не переохлаждённой воды в виде дождя, мокрого снега, капель тумана, конденсата водяных паров. Еще один вид обледенения — это так называемых «топливный лед», формирующийся при выпадении капель непереохлажденной воды в условиях высокой влажности при положительных ($+15^{\circ}\text{C}$) или небольших отрицательных температурах воздуха в зоне размещения баков с полной заправкой топливом, имеющим еще более низкую отрицательную температуру. Накопление льда на аэродинамических поверхностях самолёта перед взлетом признано одной из самых серьезных угроз безопасности эксплуатации авиационной техники. Даже незначительное количество льда (0,08 мм) на поверхности крыла может увеличивать сопротивление и снизить подъемную силу самолёта на 25% и более. Для предотвращения негативных последствий оледенения ВС, авиационные организации проводят противообледенительную обработку воздушных судов.

Сегодня данную тематику курирует и развивает комитет (группа G12) по проблемам наземного обледенения в нескольких подразделениях, который объединяет специалистов лаборатории и технологических центров (AMIL, SMI и др.), работников органов авиационных властей, аэропортов и авиакомпаний, авиастроительных компаний (Airbus, Boeing), разработчиков и изготовителей аэродромного противообледени-

тельного оборудования, а также разработчиков и производителей противообледенительных жидкостей.

Всемирно известная международная лаборатория противообледенительных материалов (AMIL — Anti-icing Materials Laboratory) университета Квебека (Канада) занимается исследованием проблем обледенения ВС гражданской авиации, а также является организацией с международной аккредитацией для проверки и оценки основных свойств противообледенительных жидкостей (ПОЖ) — эффективности (времени защитного действия) жидкостей в нормируемых условиях наземного обледенения и их применения для обработки воздушных судов в различных странах. Сертификаты данной лаборатории имеют следующие крупнейшие производители ПОЖ (ABAIX Industries — SPCA (Франция), ADDCON EUROPE GmbH (Германия), ALAB Industries (Казахстан), ООО «Арктон» (Россия), Авиафлюид Интернэшнл Лтд (Россия), All Clear Systems (США), Baltic Ground Services (Литва), Авиация Сиань High-Tech Physical Chemical Co. Ltd (Китай) и др.)

Помимо сертификации и аprobации ПОЖ лаборатория AMIL активно занимается совместно с партнёрами научно-исследовательской работой по изучению влияния природы образовавшегося льда на адгезионные свойства. Так в работе [2] опубликованы результаты исследований жёсткости и пористости трёх типов льда на прочность его сцепления с материалом, а также влияния процесса обледенения на возникающие механизмы сцепления. Интересные данные по такой же тематике опубликованы в работе [3]. Авторы констатируют, что механизм образования льда является ключевым фактором в прогнозировании адгезии льда на разных поверхностях, а также механизмов отрыва льда от различных поверхностей и возникновения когезионных разрушений во время испытаний льда на адгезию.

Результативность деятельности комитета (G12) и его подгрупп является обновляющейся технической документацией нормативного, рекомендательного или обзорного характера. Положения докумен-

тов перед их принятием подробно обсуждаются на регулярных заседаниях по результативности исследований в лабораториях и центрах. Перед очередным осенне-зимним сезоном Федеральная авиационная администрация США, Авиационные власти Канады обнародуют обновлённую информацию с рекомендациями по выполнению ПОО и подготовки специалистов для выполнения ПОО, подготовленную с учётом информации в документах комитета G12.

Основным документом для регулирования ПОО ВС в СНГ является ICAO/IAC/COSCAP — CIS PROJECT RER 01/901. В нём обозначены роли и ответственность персонала, который на разных уровнях косвенно или прямо участвует в процессе ПОО ВС, установлены требования к обучению и подготовке персонала. Регламентированы требования к ПОЖ, их транспортировке, хранению и применению. Обозначены процедуры контроля качества ПОЖ. Подробно описан процесс ПОО ВС с мерами предосторожности и процессом передачи информации о ПОО экипажу ВС.

В 2019 году данный документ получил ряд правок, в список которых вошло разрешение на механическую обработку ВС для удаления ледяных осадков с использованием мягких скребков и щёток.

Типы ПОЖ

Для ПОО ВС гражданской авиации сегодня, в зависимости от региона полетов и аэродинамических особенностей ВС, применяют четыре типа противообледенительных жидкостей: Тип I, Тип II, Тип III, Тип IV.

Жидкости Тип I предназначены для первичной обработки воздушного судна, то есть непосредственно для удаления снега и льда с аэродинамических поверхностей воздушного судна. Жидкости Тип II, Тип III и Тип IV используются для повторной обработки воздушного судна. Они создают защитную пленку, которая предотвращает покрытие воздушного судна ледяными осадками и «освобождает» самолёт при взлете. Это происходит благодаря загустителю в их составе. Данные типы жидкостей применяются только на воз-

Таблица – Приблизительное время защитного действия в минутах в различных погодных условиях (материал обрабатываемой поверхности – металл) [4]

T_{ov} , °C	Материал критических поверхностей, включающий:	Активное образование инея	Замерзающий туман или кристаллы льда	Снег, зернистый снег, снежная крупа *			Замерзающая морось **	Мелкий замерзающий дождь !	Дождь на холодном крыле «толливное обледенение»	Другие виды осадков ***	
				Очень слабый	Слабый	Умеренный					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
-3 и выше	металл	45	11-17	18-22	11-18	6-11	8-13	2-5	2-5****		
	композит	35	9-16	12-15	6-12	3-6	8-13	2-5	1-5****		
Ниже -3 по -6	металл	45	8-13	14-17	8-14	5-8	5-9	2-5	2-5		
	композит	35	6-8	11-13	5-11	2-5	5-9	2-5	2-5		
Ниже -6 по -10	металл	45	6-10	11-13	6-11	4-6	4-7	2-5	2-5		
	композит	35	4-8	9-12	5-9	2-5	4-7	2-5	2-5		
Ниже -10	металл	45	5-9	7-8	4-7	2-4	Нет данных				
	композит	35	4-7	7-8	4-7	2-4					

* - рекомендуемые времена защитного действия реализуются для жидкостей с температурой не ниже 60 °C на выходе из распылителя и расходом жидкости не менее 1 литра на 1 кв.м чистых поверхностей ВС.

** - при наличии сомнений в определении условий «замерзающая морось» применять данные по времени защитного действия для условий «мелкий замерзающий дождь».

*** - к другим видам осадков относятся сильный снег, снежная крупа, ледяной дождь, умеренный замерзающий дождь и сильный замерзающий дождь, град.

**** - данные значения времени защитного действия рекомендуются при $T_{ov} > 0$ °C.

! - время защитного действия для условий «мелкий замерзающий дождь» следует применять и для условий слабый снег с небольшим дождем.

душных судах со скоростью отрыва передней стойки шасси более 185 км/ч.

Все типы применяемых ПОЖ являются антифризами с температурой замерзания значительно более низкой по сравнению с температурой замерзания воды.

ПОЖ Тип I представляет собой ньютоновские жидкости с большим содержанием двухатомных спиртов, в частности, этиленгликоля, диэтиленгликоля, пропиленгликоля, или их смесь. Остальными компонентами являются вода, ингибиторы коррозии, смачивающие агенты, антипенные присадки, красители. Такие жидкости перед использованием разбавляют водой так, чтобы их точка замерзания соответствовала применяемой процедуре, и нагревают, для повышения их эффективности.

ПОЖ Тип II, III, IV представляют собой неньютоновские жидкости, имеющие в своем составе все те же компоненты. Применяются они неразбавленными, что позволяет обеспечить нанесение путем распыления толстого покрытия на поверхности самолета.

ПОЖ Тип II и IV применяются и в разбавленном виде в случаях, когда окружающий воздух имеет сравнительно высокую температуру и наблюдается небольшое количество осадков.

Основные критерии ПОЖ

Одним из основных критериев ПОЖ является «время защитного действия» (Holdover time), который характеризует время, в течение которого защитный слой жидкости остается на поверхности самолё-

та и препятствует образованию и формированию новых снежно-ледяных отложений. Отсчёт времени защитного действия начинается с момента нанесения ПОЖ на поверхности ВС при выполнении одноступенчатой противообледенительной обработки, или с начала выполнения второго (защитного) этапа при двухступенчатой противообледенительной обработки. В качестве примера можно рассмотреть рекомендации «holdover time table» ПОЖ «Арктика ДГ» и её водной смеси с содержанием ПОЖ не ниже 75% (по объёму) в зависимости от вида осадков и T_{ov} (таблица) [4].

Однако существует ряд природных и технологических факторов, которые приводят к снижению времени защитного действия: высокая интенсивность осадков, силь-

ный ветер, реактивная струя от работающих двигателей соседнего ВС, наличие в баках ВС топлива с температурой ниже температуры окружающего воздуха, плохая подготовка поверхностей ВС при выполнении механической очистки от СЛО. Особое внимание при ПОО следует обратить на образование однородной, сплошной пленки ПОЖ, так как наличие разрывов в пленке ПОЖ свидетельствует о том, что она, в данных условиях выполнения ПОО, не обладает защитными действиями.

Аэропорты Российской Федерации используют противообледенительные жидкости в соответствии с «Перечнем противообледенительных жидкостей (ПОЖ), допущенных к применению для защиты от наземного обледенения ВС ГА в осенне-зимний период 2019-2020 гг.», утвержденным генеральным директором ФГУП ГосНИИ ГА 25.11.2019.

Основные компоненты ПОЖ

Известно, что ПОЖ состоит из основного компонента с пониженной температурой замерзания (КПГЗ), загустителя, поверхностино-активного вещества (ПАВ), ингибитора коррозии и, при необходимости, антивспенивающего агента [5].

Компоненты с пониженной температурой замерзания имеют:

- низкую молярную массу (температура замерзания соответствует молярной концентрации вещества);
- сильные водородные связи (присутствие спиртовых или аминогрупп);
- атомы кислорода для усиления водородных связей и полярного взаимодействия с водой (с целью снижения его биологического потребления кислорода (БПК));
- неионогенные свойства (с целью совмещения их с другими компонентами смеси и повышения их химической стойкости в растворе с водой);
- свойства термостабильности (свойства при значительном изменении температуры не должны меняться), а также низкую химическую реактивность.

Сегодня в гражданской авиации

применяются пропиленгликоль и диэтиленгликоль, ввиду наличия в молекулах данных веществ двух спиртовых групп, которые способствуют образованию внутри и межмолекулярных водородных связей с другими веществами, содержащими электроотрицательный атом.

Данные компоненты с пониженной температурой замерзания применяются в связи с их низкой стоимостью [6].

ПАВ

Одним из ключевых свойств, которым должна обладать противообледенительная жидкость – это поверхностное натяжение. Его значение должно быть максимально низким, чтобы обеспечить равномерное нанесение жидкости на воздушное судно. Придание противообледенительной жидкости данного свойства обеспечивает добавление в ее состав поверхностино-активного вещества.

При выборе поверхностино-активных веществ для производства противообледенительных жидкостей необходимо учитывать следующие показатели [7]:

1. Совместимость поверхностино-активных веществ с основными компонентами противообледенительной жидкости;
2. Экологическая безопасность и низкая токсичность;
3. Поверхностно-активные свойства (гидрофильно-липофильный баланс, критическая концентрация мицеллообразования).

Согласно проведенным исследованиям [7] наиболее оптимальными ПАВ, которые рекомендуют использовать в составе противообледенительных жидкостей, для увеличения смачивающих свойств и снижения поверхностного натяжения являются сополимеры оксидов этилена и пропилена.

Широкое распространение для противообледенительной обработки благодаря низкой токсичности получили ПАВ Tergitol L-64 и Tergitol TMN-10, которые отвечают требованиям, указанным выше.

Загустители

Эффективная защита воздушного судна при обработке против-

вообледенительными жидкостями обеспечивается благодаря высокой вязкости, которая позволяет получить на поверхности самолета защитную пленку увеличенной толщины и, следовательно, увеличивать время действия жидкости.

Авторы уточняют [8], что в условиях различных видов осадков, в зависимости от температуры наружного воздуха и концентрации, защитное действие ПОЖ может составлять от 20-40 минут до 1-1,5 часа, что должно быть практически достаточно для обеспечения безопасности взлета в большинстве случаев. ПОЖ должны обладать неньютоновскими реологическими характеристиками, т.е. их вязкость должна уменьшаться при возрастании скорости сдвига. Неньютоновские свойства ПОЖ достигаются путем введения в их состав загустителей.

Загустители – это гидроколлоидные вещества, увеличивающие вязкость различных химических систем благодаря молекулам, которые представляют собой линейные или разветвленные полимерные цепи, свёрнутые в клубки. Благодаря особенностям своей структуры и многочисленным полярным группам, особенно гидроксильным, загустители, добавленные в химические системы, содержащие воду, активно вступают во взаимодействие с ней.

Механизм взаимодействия следующий. Полярные молекулы воды располагаются вокруг полярных групп загустителя. Благодаря сольватации, которая часто сопровождается раскручиванием молекулы, подвижность молекул воды ограничивается, а вязкость раствора возрастает.

Согласно данным [9] применяемые в настоящие времена загустители делятся на две группы: органические и неорганические.

К органическим загустителям относят высокомолекулярные соединения, представленные биополимерами, их производными и продуктами их деструкции, а также синтетическими полимерами.

К неорганическим загустителям относят коллоидные двухфазовые системы с ярко выраженной поверхностью раздела. В основном это неорганические твердые вещества, в состав которых входят три компонента, образующих устойчи-

вую внутреннюю структуру. Два компонента выступают в качестве внутренней и наружной фазами системы, а третий компонент – диспергатором или стабилизатором системы.

Авторы в работе [8] поясняют, что при использовании неорганических загустителей существует высокая вероятность образования сухих остатков на обрабатываемых поверхностях после высыхания ПОЖ, что может привести к их накоплению и нарушениям в работе подвижных элементов рулевых поверхностей конструкции самолета.

Еще одним важным фактором, определяющим выбор загустителя, является токсичность и создание необходимой концентрации в смеси для соответствия эксплуатационным требованиям, предъявляемым к ПОЖ.

Таким образом, перспективными загустителями являются Kelcan KIA96 и Kelcan Kalzan HP – низкотоксичные органические загустители, с летальной концентрацией (ЛК) для живых организмов 450000 мг/л. Необходимая концентрация для создания вязкости, соответствующей современным ПОЖ тип-IV – 0,75 и 0,5% соответственно.

Несколько более токсичным является Carbopol EZ-4 в смеси с триэтаноламином (ЛК равна 106000 мг/л), однако необходимая концентрация его в ПОЖ меньше и равна 0,1%.

Ингибиторы коррозии (ИК)

Эффективны для снижения коррозии конструкционных элементов из алюминия и его сплавов неорганические водорастворимые молибдаты, силикаты и нитраты щелочных и щелочноземельных металлов, а для снижения агрессивного воздействия водно-гликолевых растворов на свинцово-оловянные сплавы (припои) – тетраборат натрия десятиводный (бура) и бензоат натрия [10]. Для стали эффективное ингибитирующее действие показали замещенные бензимидазола, уротропин и триэтаноламин и ряд других препаратов [11].

Оптимальные анткоррозионные свойства ПОЖ обеспечиваются подбором ингибиторов коррозии. Так, по данным авторов [10, 11] в составах антиобледини-

тельных жидкостей зарубежного и отечественного производства, в качестве ингибиторов коррозии встречаются фосфаты щелочных металлов (калий фосфорнокислый двузамещенный трехводный, динатрийфосфат 12-ти водный), низшие алкилфосфаты, как этилфосфат, диметилфосфат, изопропилфосфат, фосфаты сложных эфиров.

Органические вещества также применяются в качестве ингибиторов коррозии, это чаще всего соединения, содержащие гетероатомные включения в виде азота, серы, фосфора, кислорода [10].

Механизм действия таких ингибиторов, представляющих собой органические молекулы с азотом и/или серой в полярных группах, адсорбционный. Ингибиторы адсорбируются на поверхности металла и экранируют ее от разъедающего действия агрессивных компонентов. Молекулы ингибитора при этом находятся в динамическом равновесии с поверхностью металла и непосредственно не расходуются. Тем не менее, при обработке металлических деталей происходит постепенное снижение концентрации ингибитора за счет его уноса и адсорбции на обрабатываемых поверхностях [12].

При применении комплексных составов ингибиторов ингибитирующее действие связано как с адсорбционным, так и с химическим взаимодействием активных компонентов с защищаемой поверхностью. Такие ингибиторы считаются наиболее эффективными, в связи с чем в составе ПОЖ чаще всего применяются смеси ингибиторов, обладающих комплексным действием.

Заключение

В работе рассмотрены особенности противообледенительной обработки воздушных судов и применяемые для нее средства. Показано, что время защитного действия противообледенительных жидкостей определяется их составом, климатическими факторами и условиями эксплуатации.

Обосновано применение в качестве компонентов с пониженной температурой замерзания пропиленгликоля и диэтиленгликоля.

Показана необходимость учета

при выборе ПАВ не только поверхностно-активных свойств веществ, но и их совместимости с другими компонентами ПОЖ, экологической безопасности применения.

Рассмотрены виды загустителей, механизм их действия, критерии выбора, на основании чего обоснован выбор органических веществ.

Показано, что для снижения коррозии конструкционных элементов обрабатываемых ПОЖ поверхностей, эффективным будет применение комплексных составов ингибиторов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Бондаренко, О.М. Проблемы регулирования утилизации стоков противообледенительных жидкостей в аэропортах России и за рубежом / О.М. Бондаренко // Сборник научных трудов ГосНИИ ГА. – 2010. – № 311. – С. 151-154.
- The effect of ice type on ice adhesion / Sigrid Rónneberg [et al.] // AIP Advances. – 2019. – Vol. 9. – P. 1-7.
- Interlaboratory Study of Ice Adhesion Using Different Techniques / Sigrid Rónneberg [et al.] // Coatings. – 2019. – Vol.9. – P. 678-690.
- Инструкция по применению противообледенительной жидкости «Арктика ДГ» тип I, ТУ 2422-003-26759308-2005. – Введ. ноябрь 2014. – М.: ООО НПП «Арктон», 2014. – 19 с.
- Ellis, N.D. Effects of Anti-icing/De-icing Fluids on the Take-off Performance of Commuter Aircraft / N.D. Ellis, T.R. Nettleton, B. Eggleston // Report DHC-TDC-90-1. Transport Canada DeHavilland. – 1991. – Mar. – 12 p.
- Поверхностно-активные вещества в составах противообледенительных жидкостей / Р.Р. Мингазов [и др.] // Вестник технологического университета. - 2015. – Т.18, № 6. – С. 85-87.
- Загустители в составах противообледенительных жидкостей / Д.А. Куряшов [и др.] // Вестник технологического университета. – 2015. – Т.18, № 5. – С. 77-79.
- Анисимов, А.М. Загустители и их применение / А.М. Анисимов. – М.: МРЭ Пресс, 2005. – 123 с.
- Ингибиторы коррозии в составах противообледенительных жидкостей / О. Ю. Сладовская, [и др.] // Вестник технологического университета. – 2015. – Т.18, № 5. – С. 84-86.
- Разработка охлаждающих жидкостей нового поколения с улучшенными эксплуатационными свойствами / Н.Ю. Башкирцева [и др.] // Вестник казанского технологического университета. – 2012. – № 1. – С. 24-29.
- Разработка ингибиторов коррозии и электролитов комплексного действия на их основе / М.П. Базанов [и др.] // Химия и химическая технология. – 2009. – Т. 52, В. 7. – С. 57-60.

REFERENCES

1. Bondarenko, O.M. Problems of regulating the disposal of effluents of anti-icing fluids at airports in Russia and abroad / O.M. Bondarenko // Collection of scientific works of the State Research Institute of Civil Aviation – 2010. – No. 311 – P. 151-154.
2. The effect of ice type on ice adhesion / Sigrid Rónneberg [et al.] // AIP Advances. – 2019. – Vol. 9. – P. 1-7.
3. Interlaboratory Study of Ice Adhesion Using Different Techniques / Sigrid Rónneberg [et al.] // Coatings. – 2019. – Vol.9. – P.678-690.
4. Instructions for the use of anti-icing fluid "Arctic DG" type I, TU 2422-003-26759308-2005.- Introduction. November 2014. – M.: OOO NPP "Arkton", 2014. – 19 p.
5. Ellis, N.D. Effects of Anti-icing/De-icing Fluids on the Take-off Performance of Commuter Aircraft / N.D. Ellis, T.R. Nettleton, B. Eggleston // Report DHC-TDC-90-1. Transport Canada DeHavilland. – 1991. – Mar. – 12 p.
6. Surfactants in the compositions of anti-icing liquids / R.R. Mingazov [et al.] // Bulletin of the Technological University. – 2015. – T.18, No. 6. – P.85-87.
7. Thickeners in the compositions of anti-icing liquids / D.A. Kuryashov [et al.] // Bulletin of the Technological University. – 2015. – T.18, No. 5. – P.77-79.
8. Anisimov, A.M. Thickeners and their application / A.M. Anisimov. – M.: MRZ Press, 2005. – 123 p.
9. Corrosion inhibitors in the compositions of anti-icing liquids / O.Yu. Sladovskaya [et al.] // Bulletin of the Technological University. – 2015. – T.18, No. 5. – P.84-86.
10. Development of new generation coolants with improved operational properties / N.Yu.Bashkirtseva [et al.] // Bulletin of Kazan Technological University. – 2012. – No. 1. – P.24-29.
11. Development of corrosion inhibitors and complex-action electrolytes on their basis / M.P. Bazanov [et al.] // Chemistry and chemical technology. – 2009. – T. 52, issue. 7. – P. 57-60.

*Статья поступила в редакцию
03.03.2021*

КОНЦЕПЦИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЛЕТОВ БЕСПИЛОТНОЙ АВИАЦИИ

Артем Артурович Шегидевич – кандидат технических наук, ректор учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
sh.a.bgaa@tut.by

Валерий Николаевич Степаненко – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры технической эксплуатации воздушных судов и двигателей учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
valeristepanenko@gmail.com

Сергей Дмитриевич Юхневич – курсант учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
sergei.museum@gmail.com

Artem Shegidevich – Candidate of Technical Sciences, Rector of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
sh.a.bgaa@tut.by

Valery Stepanenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Technical Operation of Aircraft and Engines of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
valeristepanenko@gmail.com

Sergei Yukhnevich – cadet of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
sergei.museum@gmail.com

Аннотация: в работе представлен научный анализ преобразования одних видов энергии в другие. В частности, в данном случае рассматривается преобразование солнечной энергии в механическую. Объектом исследования являются солнечные энергетические установки, предметом исследования – метод и средства для реализации безмашинного преобразования энергии солнечного излучения в механическую энергию.

Ключевые слова: полеты, энергообеспечение, гелиоэнергетика, солнечное излучение, энергетическая установка, механика, преобразование, теплоноситель, рабочее тело.

Abstract: the paper presents a scientific analysis of the transformation of some types of energy into others. In particular, in this case, the conversion of solar energy into mechanical energy is considered. The object of research is solar power plants, the subject of research is a method and means for the implementation of machineless conversion of solar radiation energy into mechanical energy.

Keywords: flights, power supply, solar energy, solar radiation, power plant, mechanics, transformation, coolant, working fluid.

Солнце является одним из наиболее привлекательных экологически чистых альтернативных источников энергии. Полный поток солнечной энергии, падающий на Землю, составляет $1,8 \cdot 10^{17}$ Вт. С учетом поглощения и рассеяния в атмосфере достигает поверхности Земли $1,3 \cdot 10^{17}$ Вт. Это почти в 5630 раз превышает сегодняшний уровень потока солнечной энергии, используемого всем

человечеством (по данным за 2020 год) [1].

Средняя мощность потока солнечного излучения на Землю составляет примерно $0,93 \text{ кВт}/\text{м}^2$ [2].

Перспективность разработок в области гелиоэнергетики обосновывается интенсивной динамикой роста электрических мощностей солнечной энергетики (получаемых с помощью преобразователей солнечной энергии) в мире:

в 2000 году суммарная мировая электрическая мощность составляла около 1 ГВт, то 2020 году ее величина возросла до значения примерно 66 ГВт, а к 2030 году прогнозируется достижение отметки в 100 ГВт [1].

При этом не предполагается упразднение других направлений традиционной и альтернативной энергетики.

Авторами предлагается кон-

цепт перспективной разработки по высокоеффективному преобразованию энергии солнечного излучения в механическую энергию, применимых для производства энергетических установок с различной выходной мощностью.

Методика расчета и разработка стенда

Авторами предлагается разработка солнечной энергетической установки (далее – СЭУ), определяемая следующими свойствами:

- Модульность конструкции;
- Стабильное функционирование вне зависимости от времени суток, сезона, метеоусловий и геопозиций;
- Бесшумность (уровень шума практически равен нулю);
- Простота в эксплуатации: сборки, разборки и использования по назначению;
- Простота технического обслуживания и ремонта (далее – ТОиР);
- Безопасность при эксплуатации, ТОиР;
- Экономичность (конструкция не предполагает расхода рабочего тела);
- Экологичность.

Принцип работы СЭУ заключается в прямом преобразовании тепловой энергии солнечного излучения в механическую энергию с последующим преобразованием (при необходимости) в электрическую энергию (рис. 1). СЭУ можно использовать в качестве двигателя для различных целей, в первую очередь, для выработки электроэнергии.

Описание конструкции и работы разрабатываемой энергоустановки

Рабочими элементами СЭУ являются сильфоны (рис. 2). В каждый сильфон через специальное отверстие предполагается помещать необходимое (заранее рассчитанное) количество рабочего вещества (теплоносителя). Заправленный сильфон герметизируется.

На торцах сильфонов закреплены защепы, ограничивающие их перемещение. Оба торца могут перемещаться только в одну сторону благодаря сцеплению защепа с направляющей поверхностью. В



Рис. 1. Принцип работы СЭУ

исходном состоянии, при комнатной температуре сильфон сжат, теплоноситель при этом пребывает в исходном состоянии (рис. 2, а). При нагревании каждого сильфона (например, солнечными лучами) теплоноситель испаряется, повышается давление его пара в сильфоне, происходит удлинение сильфона – переднее донышко сильфона перемещается под давлением пара. Зацепы сильфона позволяют переместиться лишь одному из его торцов (рис. 2, б). Наступает состояние, когда теплоноситель полностью испарился в нагретом солнцем сильфоне; давление пара теплоносителя в сильфоне соответствует его максимальному рабочему давлению (рис. 2, в). Затем, при исключении попадания солнечных лучей на поверхность сильфона (попадание сильфона в теневую зону), он охлаждается, теплоноситель конденсируется и, следовательно, давление его пара в сильфоне уменьшается. Поскольку у перемещающихся торцов сильфона имеется лишь одна степень свободы, другой («задний») торец «подтягивается» к «переднему», стоящему неподвижно (рис. 2, г). Расстояние, на которое перемещается сильфон (каждый из его торцов), равное величине его рабочего хода при данном давлении насыщенного пара находящегося внутри него теплоносителя, определяется как рабочий ход сильфона (рис. 2, г).

Циклическое повторение этих итераций позволяет получить перемещение сцепки сильфонов по заданной траектории. Таким образом, тепловая энергия, получаемая сильфонами СЭУ от солнца, преобразуется прямо в механическую.

СЭУ имеет две рабочие зоны: зону нагрева (удлинения сильфонов) (рис. 3, а) и зону охлаждения (сжатия сильфонов) (рис. 3, б).

Зона нагрева СЭУ является зоной прямого взаимодействия

сильфонов с источником энергии (например, падения солнечных лучей, нагрева с помощью гелиотермальной энергии и пр.), благодаря чему сильфоны нагреваются и удлиняются. Передние торцы нагретых сильфонов перемещаются по замкнутой траектории в зону охлаждения СЭУ (сжатия сильфонов) в тени или в среде выбранного хладагента.

Количество заправляемого в сильфон рабочего тела должно быть согласовано со временем пребывания сильфона в зоне нагрева (время пребывания должно совпадать со временем полного испарения данного количества рабочего тела в сильфоне).

Предполагаемое устройство СЭУ приведено на рис. 4.

Зубчатое колесо в центре установки будет соединено с валом механического электрогенератора или другим движимым объектом.

Для равномерной работы цепи сильфонов (при равенстве тепловых потоков при их нагреве и охлаждении) предполагается конструирование узла охлаждения сильфонов (конденсатора) с возможностью регулирования интенсивности теплообмена.

Для оптимизации количества подводимой энергии (например, солнечного излучения) могут быть использованы концентраторы, а для повышения интенсивности охлаждения – конденсатор погружного типа, предусматривающий охлаждение сильфонов в холодной воде (в идеале, проточной).

Теплоноситель и рабочее тело разрабатываемой энергоустановки

В качестве рабочего тела в СЭУ предполагается легкокипящая жидкость.

Представляется целесообразным применение в качестве рабочих тел и теплоносителей хи-

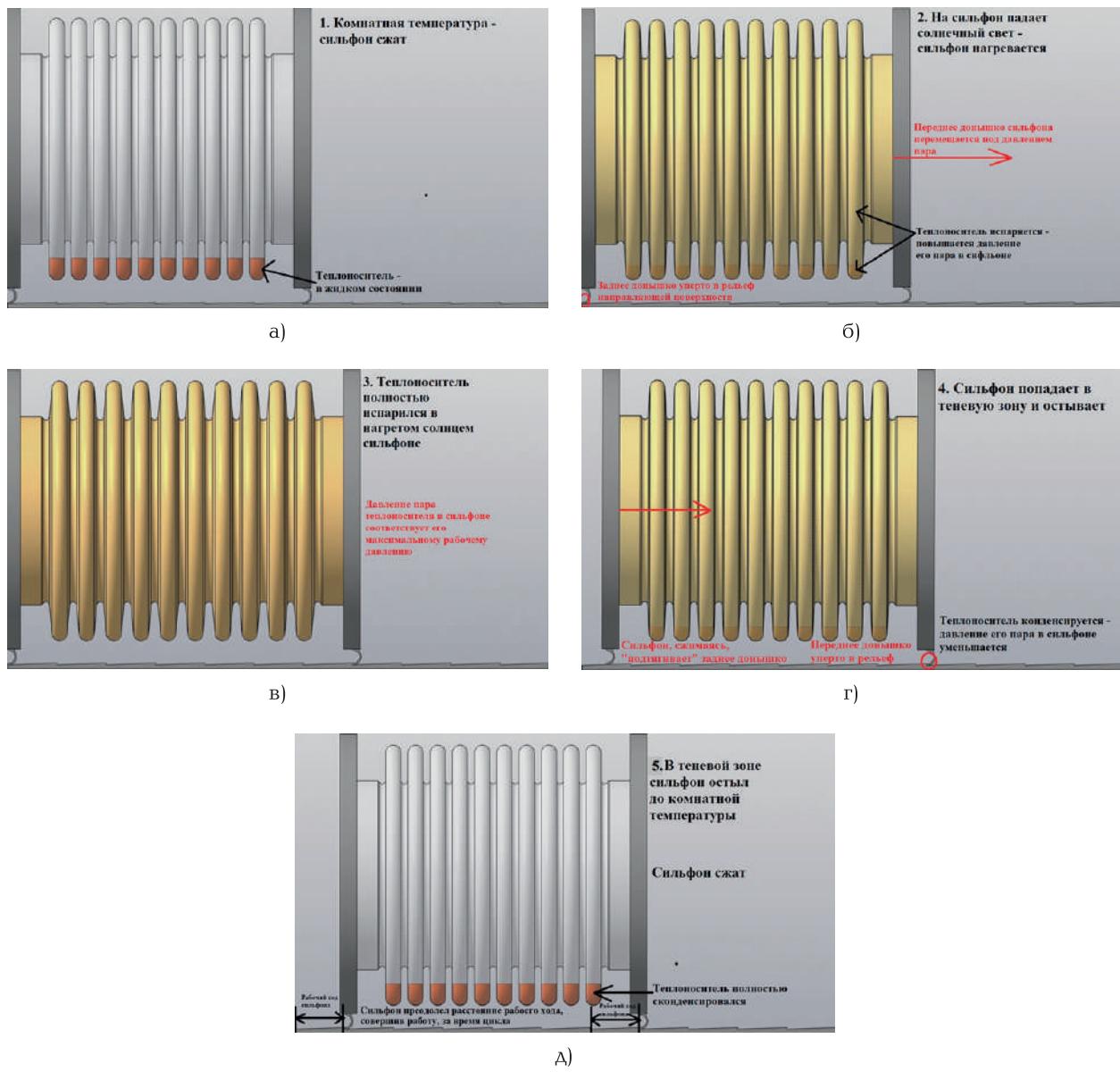


Рис. 2. Рабочий цикл сильфона:

а – комнатная температура, сильфон скат; б – на сильфон падает солнечный свет – сильфон нагревается и начинает удлиняться; в – теплоноситель полностью испарился в нагретом солнцем сильфоне; г – сильфон попадает в теневую зону и остывает; д – в теневой зоне, сильфон преодолел расстояние рабочего хода, совершив работу, за время цикла

мически реагирующих смесей, в которых происходят обратимые химические реакции, сопровождающиеся тепловыми эффектами и изменением числа молей. Увеличение числа молей при нагреве и уменьшение его при охлаждении подводит к увеличению эффективности термодинамического цикла, а наличие теплового эффекта в химически реагирующей системе обеспечивает высокие значения тепловых свойств из-за передачи значительного количества тепла путем концентрационной диффузии [3].

Отличительной особенностью диссоциирующих газов являются высокие значения их тепловых свойств за счет протекающих в них химических реакций с большим тепловым эффектом [4].

Из большого класса химически реагирующих систем, в которых реакции протекают с увеличением числа молей и поглощением тепла при диссоциации газа, наиболее изученной является система $N_2O_4 \leftrightarrow 2NO_2 \leftrightarrow 2NO + O_2$ [3].

Тетраоксид азота N_2O_4 – одна из самых легкокипящих жид-

костей (температура кипения $T_{кип} = +21,15^{\circ}\text{C}$ при давлении $p = 101,325 \text{ кПа}$). Также тетраоксид азота обладает малой удельной теплотой парообразования ($r = 46,05 \text{ кДж/К}$ при температуре $+30^{\circ}\text{C}$), что говорит о небольших энергетических затратах на фазовый переход и определяет высокий КПД рабочего цикла СЭУ [5]. Высокие теплофизические свойства N_2O_4 позволяют обеспечить интенсивный теплосъем в теплообменном оборудовании солнечных электростанций [4].

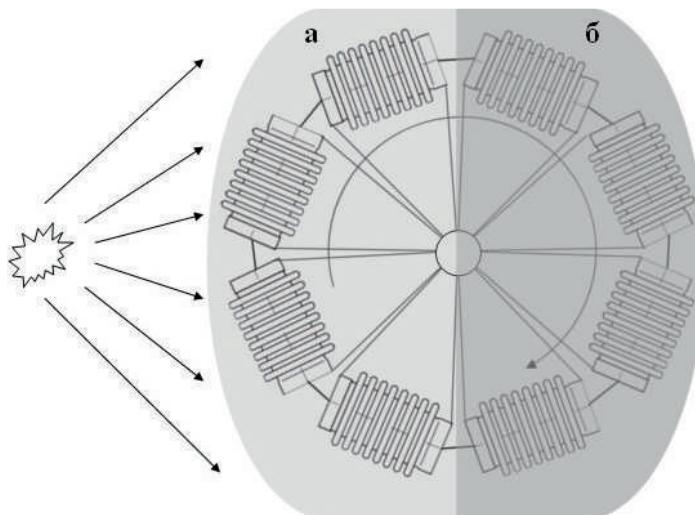


Рис. 3. Рабочие зоны СЭУ с замкнутой траекторией движения сильфонов:
а – зона нагрева (удлинения сильфонов); б – зона охлаждения (сжатия сильфонов)

Перспективность применения химически реагирующей четырехокиси азота в качестве теплоносителя и рабочего тела солнечных электростанций (СЭС) описана в одноименной работе В.А. Немцева и В.Н. Степаненко [4].

В таблице 1 представлено сравнение некоторых теплофизических характеристик тетраоксида азота N_2O_4 , диэтилового эфира $C_4H_{10}O$ (самого легкокипящего эфира) и воды H_2O [5, 9, 10], которое свидетельствует о незначительных энергетических затратах на совершение фазовых переходов (испарения и конденсации в цикле).

Поскольку тетраоксид азота – сильный окислитель, то сильфоны должны быть выполнены из нержавеющей стали. В качестве варианта

рабочих элементов СЭУ авторами предлагаются сильфоны однослойные стальные специальные, изготовленные из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т или 08Х18Н10Т.

Коррозия хромистых и хромоникелевых сталей в жидком тетраоксиде азота мала и составляет 0,0006–0,003 мм/год [9].

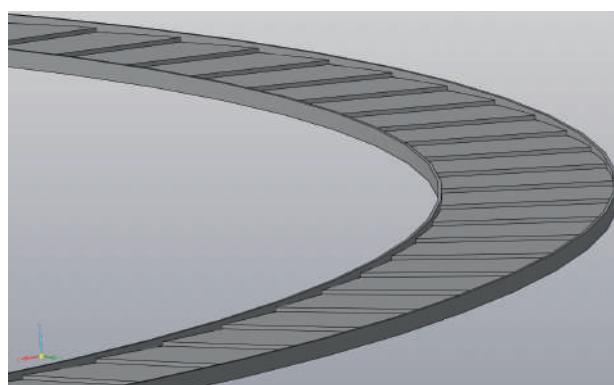
Не следует преувеличивать влияние окислительных свойств тетраоксида азота на целостность и безопасность установок. Опытным путем установлено, что при кипении и конденсации теплоносителя и рабочего тела СЭУ – тетраоксида азота – скорость коррозии нержавеющих сталей составляет 0,0002–0,002 мм/год. В этих условиях коррозия носит общий характер без признаков межкристаллит-

ной, питтинговой и других видов коррозии, не наблюдается даже азотирования, обезуглероживания и насыщения кислородом объема материалов [9].

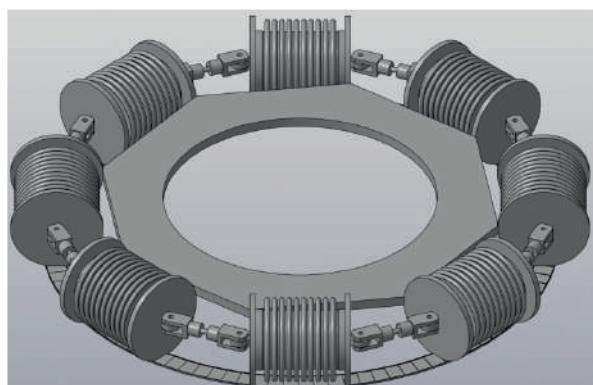
Эксперименты, проведенные в Институте ядерной энергетики Академии наук БССР (ИЯЭ АН БСССР) «Сосны» показали, что сильфоны, выполненные из стали 08Х18Н10Т после испытания при контакте с тетраоксидом азота в напряженном состоянии при температуре +547 °C и давлении 5 МПа в течение 1000 ч сохранили свою исходную циклическую прочность. Специфических видов коррозии в основном металле и сварных соединениях не обнаружено [9].

Во взаимодействии с водой тетраоксид азота образует азотную кислоту HNO_3 , содержание которой в рабочем теле установок выше установленного предела в 0,2–0,3% резко увеличивает скорость коррозии конструкционных материалов [9] и представляет опасность для человека.

Однако в температурном интервале +17...+97 °C (в который входит рабочий диапазон температур описываемых СЭУ) коррозия протекает медленно, появляется возможность пассивирования. Скорость коррозии конструкционных материалов в тетраоксиде азота, даже загрязненном 3% азотной кислоты, не превышает 0,0005–0,003 мм/год, а для стали 12Х18Н10Т (из нержавеющих сталей с таким же содержанием хрома, никеля и титана (12Х18Н10Т или 08Х18Н10Т) планируется изго-



а)



б)

Рис. 4. Предполагаемое устройство СЭУ:
а – общий вид СЭУ; б – участок направляющей поверхности

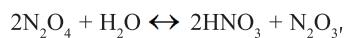
Таблица – Некоторые теплофизические характеристики тетраоксида азота N_2O_4 , диэтилового эфира $C_4H_{10}O$ и воды H_2O

Характеристика/вещество	Тетраоксид азота N_2O_4	Диэтиловый эфир $C_4H_{10}O$	Вода H_2O
Температура кипения, °C	+21,15	+34,6	+100
Давление насыщенного пара, кПа при температуре +30 °C	149900	101325	4,2417
Удельная теплота парообразования, кДж/кг при температуре +30 °C	46,05	353,8	2430,2

тавливать рабочие элементы СЭУ) коррозия ускоряет ее пассивирование [9].

Тем не менее, особое внимание необходимо уделить проверки чистоты азотного тетраоксида как рабочего тела СЭУ. При необходимости, тетраоксид азота можно очистить от водных и иных примесей. Наиболее эффективным в этом вопросе показал себя способ ректификации, успешно применяющийся в промышленности на протяжении многих десятилетий.

Снижение коррозионной активности тетраоксида азота может быть достигнуто введением в него сверхстехиометрических количеств оксида азота NO (примерно в три раза больших, чем примесных элементов), который смещает динамическое равновесие влево в реакции



и тем самым выводит из смеси коррозионно-активный компонент [9].

Смесь $N_2O_4 + NO$, получившая название нитрин, успешно зарекомендовала себя в ходе многократных испытаний и длительной работы в испытательных стендах ИЯЭ АН БССР «Сосны», продемонстрировав низкие окислительные свойства и высокую безопасность применения в различных установках [9].

В процессе испытаний при параметрах АЭС БРИГ-300 в теплоносителе «нитрин» в жидким состоянии большинство промышленных марок нержавеющих сталей и сплавов (Х13, Х17, Х18Н10Т, Х11Н10М2, Х23Н28М3Д3Т, ХН77ТЮР), а также сплавов на основе алюминия и титана имеют низкую скорость коррозии, составляющую 0,0008–0,001 мм/год [9].

Рабочие параметры (температура и давление) описываемых СЭУ будут значительно меньшими, чем у АЭС, соответственно и скорость коррозии материалов их конструкции будет на порядок ниже.

Ингибитирующее действие оксида азота отчетливо проявилось во всех элементах циркуляционного контура с газожидкостным циклом на тетраоксиде азота, но особенно отчетливо выражалось в зоне кипения и конденсации при повышенных содержаниях (0,3–1 %) азотной кислоты, где при введении 1–3% оксида азота скорость коррозии снижалась в 50–60 раз [9].

Заключение

Традиционные источники преобразования энергии солнечного излучения (главным образом, фотоэлектрические способы) в другие виды энергии имеют, как правило, ряд общих типичных недостатков:

- *фотовольтаическая солнечная батарея;*
- *низкий КПД преобразования солнечной энергии в электрическую (в современных солнечных батареях потери составляют порядка 80 % энергии);*
- *трудность и высокая стоимость утилизации фотоэлементов, выработавших ресурс.*

Прямое преобразование солнечной энергии в механическую позволит избавиться от большинства недостатков традиционной гелиоэнергетики, а предлагаемая в данном проекте концепция преобразователя будет обладать приемлемыми для пользователей массогабаритными характеристиками и, вместе с этим, невысокой стоимостью. Конструкция двигателя может быть представлена единственным малым, легким и

недорогим модулем или многомодульной сборкой.

Основные преимущества предлагаемой технологии в том, что солнечный двигатель:

- *не нуждается в питании от линии электропередачи;*
- *не требует подвоза каких-либо видов топлива;*
- *используя энергию солнца, может быть расположен и функционировать непосредственно возле обслуживаемого объекта.*
- *и ряд других преимуществ.*

Все они определяют экономичность, простоту реализации предлагаемой технологии и надежность солнечного двигателя в эксплуатации.

Анализ выполненных в мире проектов позволяет утверждать, что энергетическая установка для получения электричества с использованием тепла концентрированного солнечного излучения будет более производительной, экономичной, простой в эксплуатации и работоспособной даже в жарких районах, удаленных от источников воды, если в контуре машинного преобразователя тепла в электричество применять в качестве теплоносителя и рабочего тела вещество – четырехокись азота N_2O_4 .

Диссоциирующая четырехокись азота, как теплоноситель и рабочее тело машинного преобразования тепла, имеет и ряд иных привлекательных особенностей, а именно:

- *относительно малую величину скрытой теплоты конденсации, что для охлаждения конденсатора позволяет использовать даже атмосферный воздух;*
- *чрезвычайно большие значения теплоемкости и теплопроводности в широком интервале*

- температуру и давлений, что определяет малые размеры и металлоемкость теплообменного оборудования;*
- *значительный вклад в теплообмен механизма концентрационной диффузии;*
 - *наличие параметров линии насыщения, при которых возможна организация газожидкостного цикла в приемлемой для практики области температур и давлений;*
 - *высокие значения термических КПД газожидкостных циклов для широкого интервала температур и давлений;*
 - *наличие стойких конструкционных материалов для среды N_2O_4 в достаточном для практики диапазоне температур и давления;*
 - *доступность средств техники безопасности, необходимых для защиты обслуживающего персонала и окружающей среды.*

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Новая технология ускоренного освоения солнечной энергии / А. И. Карелин [и др.] // Промышленная теплотехника. – 2004. – Т. 26, № 5. – С. 61-66.
2. Мейтин, М. Фотовольтаика: материалы, технологии, перспективы. Пусть всегда будет Солнце / М. Мейтин // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2000. – № 6. – С. 40-46.
3. Степаненко, В.Н. Исследование теплообмена и гидравлического сопротивления при охлаждении турбулентного потока химически реагирующей системы $N_2O_4 \rightleftharpoons 2NO_2 \rightleftharpoons 2NO + O_2$ в трубе при повышенных температурах стенки : дис. ... кан. тех. наук : 05.14.03 / В.Н. Степаненко. – Минск, 1976. – 198 с. – Библиогр.: с. 146-160.
4. Немцев, В.А. Перспективность применения химически реагирующей четырехокиси азота в качестве теплоносителя и рабочего тела солнечных электростанций (СЭС) / В.А.Немцев, В.Н.Степаненко // Атомная энергетика, ядерные и радиационные технологии XXI века: тезисы докладов VII Междунар. конф., Минск, 23-26 июня 2020 г. / Государственное научное учреждение «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» НАН Беларуси. – Минск, 2020. – С. 22.
5. Физико-химические и теплофизические свойства химически реагирующей системы $N_2O_4 \rightleftharpoons 2NO_2 \rightleftharpoons 2NO + O_2$ / В.Б. Нестеренко [и др.]. – Минск : Наука и техника, 1976. – 344 с.
6. Лайтхилл, М. Динамика диссоциирующего газа / М. Лайтхилл // Fluid Mech. – 1957. – Vol. 2. – С. 1-32.
7. Газотурбинная установка на диссоциирующем газе: а.с.166202 / И.М. Ковтун, А.Н. Наумов, С.Л. Косматов. – Опубл. 1964.
8. Нестеренко, В.Б. Физико-технические основы применения диссоциирующих газов как теплоносителей и рабочих тел атомных электростанций / В.Б. Нестеренко. – Минск: Наука и техника, 1971. – 312 с.
9. Нестеренко, В.Б. Физико-химические и теплофизические свойства растворов на основе четырехокиси азота / В.Б. Нестеренко. – Минск: Наука и техника, 1981. – 303 с.
10. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. Издание второе, дополненное и переработанное / Н.Б. Варгафтик. – М.: Наука, 1972. – 721 с.
11. Ривкин, С.Л. Термофизические свойства воды и водяного пара / С.Л. Ривкин, А.А. Александров. – М.: Энергия, 1980. – 424 с.
12. Сильфоны однослойные и двухслойные измерительные. – Саранск: СПЗ, 2017. – 33 с.
13. Ковалев, С.Д. Экспериментальное обследование теплообмена при турбулентном течении в круглой обогреваемой трубе химически реагирующей четырехокиси азота / С.Д. Ковалев. – Минск : Наука и техника, 1971. – 30 с.
14. Пуляев, В.Ф. Исследование тепломассопереноса при конденсации химически реагирующей системы N_2O_4 на горизонтальных трубах / В.Ф. Пуляев. – Минск : Наука и техника, 1977. – 27 с.

REFERENCES

1. New technology of accelerated development of solar energy / A.I. Kareljin [et al.] // Industrial heat engineering. –2004. – Vol. 26, No. 5. – P.61-66.
2. Meitin, M. Photovoltaics: materials, technologies, prospects. Let the Sun Always Be / M. Meitin // Electronics: Science, Technology, Business. – 2000. – No. 6. – P. 40-46.
3. Stepanenko, V.N. Investigation of heat transfer and hydraulic resistance during cooling of a turbulent flow of a chemically reacting system $N2O4 \rightleftharpoons 2NO_2 \rightleftharpoons 2NO + O_2$ in a pipe at elevated wall temperatures: dis... can.those. Sciences: 05.14.03 / V.N. Stepanenko.- Minsk, 1976. – 198 p. – Bibliography: p. 146-160.
4. Nemtsev, V.A. Prospects for the use of chemically reacting nitrogen tetroxide as a coolant and working medium for solar power plants (SPP) / V.A. Nemtsev, V.N. Stepanenko // Atomic Energy, Nuclear and Radiation Technologies of the XXI Century: VII International Conference, Minsk, June 23-26, 2020 / State Scientific Institution 'Joint Institute for Energy and Nuclear Research - Sosny' of the National Academy of Sciences of Belarus. - Minsk, 2020. – P. 22.
5. Physicochemical and thermophysical properties of the chemically reacting system $N2O4 \rightleftharpoons 2NO_2 \rightleftharpoons 2NO + O_2$ / V.B. Nesterenko. – Minsk: Science and technology, 1976. – 344 p.
6. Lighthill, M. Dissociating Gas Dynamics / M. Lighthill.–Fluid Mech. – 1957. – Vol. 2. – P. 1-32.
7. Dissociating gas turbine unit: AS 166202 "Bulletin of inventions and trade marks" / I.M. Kovtun, A.N. Naumov, S.L. Kosmatov.- 1964.
8. Nesterenko, V.B. Physical and technical basis for the use of dissociating gases as heat carriers and working bodies of nuclear power plants / V.B. Nesterenko V.B. – Minsk: Science and technology, 1971. – 312 p.
9. Nesterenko, V.B. Physicochemical and thermophysical properties of solutions based on nitrogen tetroxide / V.B. Nesterenko. – Minsk: Science and technology, 1981. – 303 p.
10. Vargaftik, N.B. Handbook on the thermophysical properties of gases and liquids / N.B. Vargaftik. – Moscow: Nauka, 1972. – 721 p.
11. Rivkin, S.L. Thermophysical properties of water and steam / S.L. Rivkin. – Moscow: Energiya, 1980. – 424 p.
12. Single-layer and double-layer measuring bellows. – Saransk: SPZ, 2017. – 33 p.
13. Kovalev, S.D. Experimental investigation of heat transfer in turbulent flow in a round heated pipe of chemically reacting nitrogen tetroxide / S.D. Kovalev. – Minsk: Science and technology, 1971. – 30 p.
14. Pulyaev, V.F. Investigation of heat and mass transfer during condensation of a chemically reacting system N_2O_4 on horizontal pipes / V.F. Pulyaev. – Minsk: Science and technology, 1977. – 27 p

Статья поступила в редакцию
27.04.2021

ОБОСНОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГТД НА ОСНОВЕ ТРИБОДИАГНОСТИКИ

Елена Анатольевна Шапорова – кандидат химических наук, доцент кафедры технической эксплуатации воздушных судов и двигателей учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
elena.telushenko@gmail.com

Alena Shaparava – Candidate of Chemical Sciences, Associate professor of the Department of Technical Operation of Aircraft and Engines of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
elena.telushenko@gmail.com

Александр Григорьевич Капустин – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры естественно-научных и общеобразовательных 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 and General Education Disciplines of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
kapustin2649@mail.ru

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

Sergey Stoiko – Master of Technical Sciences, Junior Researcher of the Research Laboratory of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
sergey_14_95@mail.ru

Аннотация: в работе представлен анализ используемых методов диагностики авиационных двигателей. На основании анализа экспериментальных данных построена статистическая модель исправного двигателя Д-30КП-2. Рассматривается обобщенный алгоритм применения нейронных сетей для контроля и диагностики технического состояния авиационного двигателя.

Ключевые слова: трибодиагностика, нейронные сети, воздушное судно, авиационный двигатель, техническое состояние ГТД.

Abstract: The paper presents an analysis of the methods used for diagnostics of aircraft engines. Based on the analysis of experimental data, a statistical model of a serviceable engine D-30KP-2. A generalized algorithm for the use of neural networks for monitoring and diagnostics is considered technical condition of the aircraft engine.

Keywords: tribodiagnostics, neural networks, aircraft, aircraft engine, technical condition of the gas turbine engine.

В настоящее время все в большей степени внедряется система эксплуатации авиационной техники по фактическому техническому состоянию. Это способствует своевременному обнаружению неисправностей и повышает экономическую эффективность технического обслуживания (ТО) и ремонта. Тем не менее, до сих пор до конца не решенным остается вопрос

о надежности и корректности данных, получаемых различными методами контроля состояния узлов и агрегатов воздушного судна (ВС), что тормозит распространение системы ТО по состоянию на эксплуатацию систем и агрегатов авиадвигателя. По оценкам специалистов инструментальные методы диагностики, используемые в настоящее время для обнаружения дефектов на ранней

стадии развития, чаще всего не дают возможности надежного прогнозирования дальнейшего функционирования двигателя [1, 2].

Установлено, что наиболее эффективными методами диагностирования авиационного двигателя по анализам проб масел являются [2, 4]:

- феррографический метод (заключается в осаждении частиц



Рис. 1. Спектроскан MAKС-G

изнашивания из пробы масла в магнитном поле на поверхности стеклянной пластины с последующим их анализом на микроскопе);

- сцинтилляционный метод (представляет собой измерение энергетического спектра на основании анализа световых вспышек (сцинтилляций), которые возникают при взаимодействии излучения с веществом детектора);
- спектральные методы – атомно-эмиссионный, рентгенофлуоресцентный (основываются на определении химического состава вещества по спектру излучения его атомов под влиянием источника возбуждения (дуги, искра, пламя, плазма), позволяет определять содержание элементов от бериллия до урана в диапазоне от 0,0001 % до 100 % массового содержания в веществах различного происхождения).

Так же установлено, что эффективность оценки состояния авиационного двигателя (АД) на основе анализа масла в значительной степени определяется временем и местом забора пробы масла на анализ [3].

Наиболее перспективным и надежным направлением для оценки состояния маслосистемы двигателя нам представляется трибодиагностика, основанная на комплексном подходе [5].

Методика эксперимента

В Республике Беларусь производства ВС и АД нет, поэтому мы можем рассматривать диагностику АД с точки зрения эксплуатации. Так, совместно с эксплуатирующей организацией ОАО «Авиакомпания Трансавиаэкспорт» проводились трибологические исследования двигателей Д-30КП-2 с помощью волнодисперсионного спектрометра «Спектроскан MAKС-G» (рис. 1), позволяющего определять содержание металлов в диапазоне от 1 до 500 ppm.

Отбор проб проводился через 15–30 минут после остановки

механических данных, полученных с четырех силовых установок в период с 2018 по 2020 годы (общее количество проанализированных проб – 144), была построена статистическая модель исправного двигателя (таблица), в рамках которой определялись следующие значения: x – среднее значение по выборке; σ – стандартное отклонение; Р-вероятность обнаружения элемента (состава частицы); $x + 2\sigma$ – верхние (односторонние) границы критического износа, при достижении которых наблюдается повышенный износ, при этом двигатель должен находиться на особом контроле; $x + 3\sigma$ – верхние (односторонние) границы критического износа, при достижении

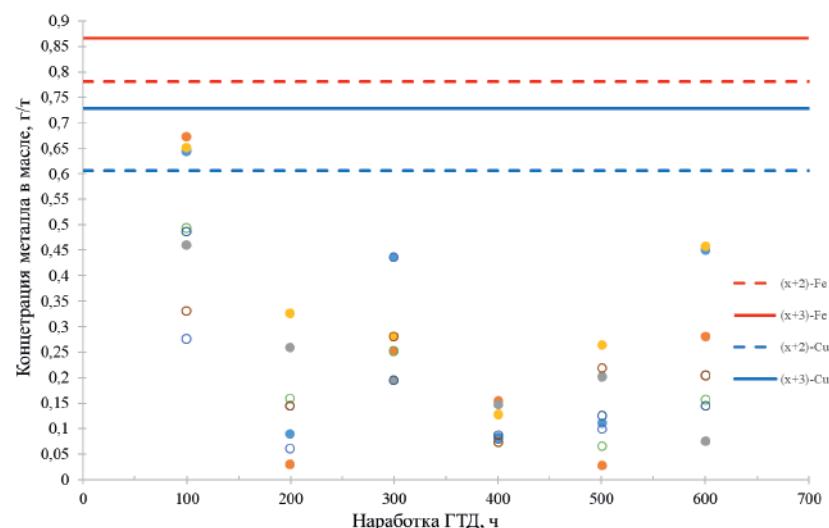


Рис. 2. Экспериментальные данные по содержанию железа (•) и меди (○) в пробах масла с указанием границ критического износа

двигателя с периодичностью 100 часов, контролировалось содержание Fe и Cu, как наиболее важных металлов для оценки технического состояния двигателя.

которых возможен отказ двигателя, разрушение его элементов.

Приняты следующие основные критерии оценки по двум измеренным элементам:

При содержании железа и меди в работающем масле меньше ($x + 2\sigma$) – износ нормальный, возможна дальнейшая эксплуатация

Таблица – Статистическая модель исправного двигателя Д-30КП-2

Элемент	Содержание, x , г/т	σ	P	$x+2\sigma$	$x+3\sigma$
Fe	0.609022	0.085798917	1	0.780619834	0.86641875
Cu	0.362562	0.122193607	1	0.606949214	0.729142821

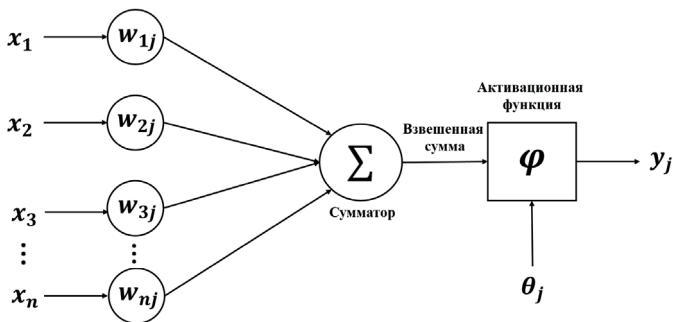


Рис. 3. Структурная модель искусственного нейрона [6]

в соответствии с руководством по эксплуатации. Если содержание определяемых элементов находится в интервале от $(x + 2\sigma)$ до $(x + 3\sigma)$ — возможен повышенный износ. При содержании железа и меди, превышающем $(x + 3\sigma)$ — зона повышенного износа.

Полученные результаты (рис. 2) свидетельствуют о том, что все изучаемые двигатели являются исправными, все экспериментальные значения не превышают границы допустимых значений, при которых необходим особый контроль двигателей при дальнейшей эксплуатации, или их снятие с эксплуатации.

Полученные результаты будут использованы при разработке прогнозной модели работоспособности авиационного двигателя на основе интеллектуального анализа экспе-

риментальных данных (с помощью нейронных сетей).

На сегодняшний день нейронные сети (НС) являются эффективным инструментом при определении состояния технического объекта. НС представляет собой систему соединенных и взаимодействующих между собой искусственных нейронов, которые реализуют скалярную функцию (значение на выходе нейрона) от векторного аргумента (некоторая выборка). Самым важным преимуществом НС перед другими классическими методами диагностики является ее универсальность, что отражается в ее способности к обучению (переобучению). Таким образом одна нейронная сеть с подобранный архитектурой может использоваться для диагностики не одного, а нескольких объектов (рис. 3).

На вход нейрона поступают сигналы ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$), которые являются выходными для других нейронов, либо входными сигналами всей нейронной сети. Входными сигналами являются нормированные признаки объекта диагностики (величина тока, напряжение и другое). Все входные сигналы нейрона умножаются на их веса ($w_{1j}, w_{2j}, w_{3j}, \dots, w_{nj}$). Веса определяются из предположения о важности признаков (важнее признак — больше вес.). Все взвешенные сигналы суммируются (в сумматоре) и образуют взвешенную сумму (передаточную функцию). Эта сумма выступает в роли аргумента для функции активации и в зависимости от этой функции формируется значение на выходе нейрона y_j , в соответствие с которым определяется класс (диагноз) для диагностируемого объекта.

Определяющим компонентом в нейроне является функция активации φ , которая определяет выходное значение нейрона в зависимости от взвешенной суммы на его входе. Значение активации нейрона определяется по формуле:

$$y_j = f \left(\sum_{i=1}^n x_i w_{ij} \right)$$

Из широкого перечня регистрируемых параметров двигателя (рис. 4), контроль которых позволяет оценить остаточный ресурс

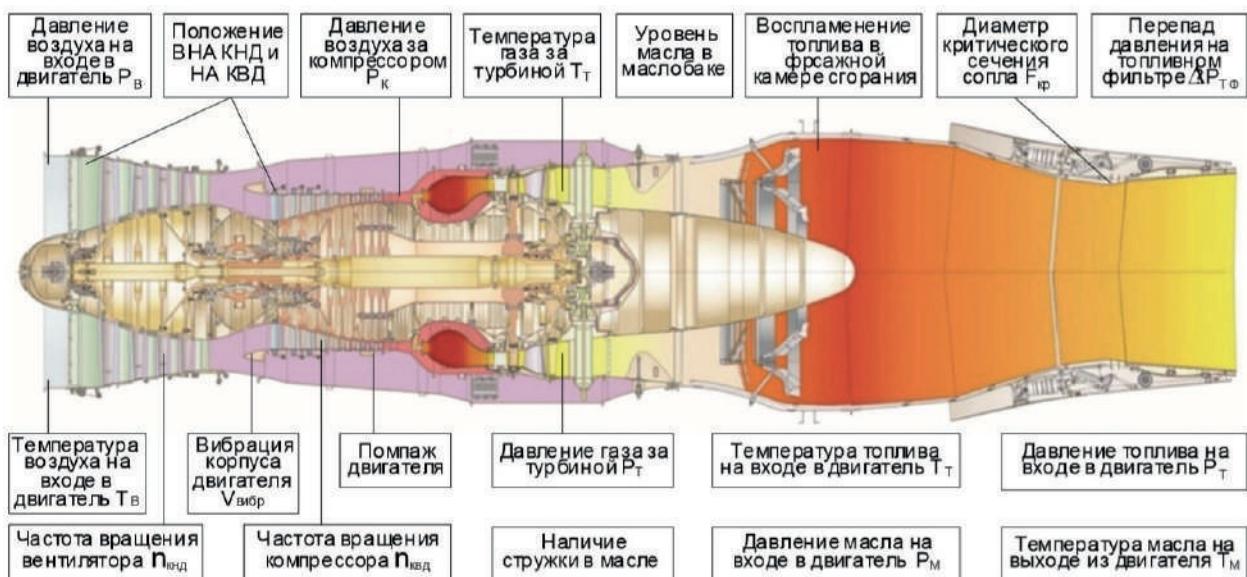


Рис. 4. Регистрируемые параметры ГТД [7]

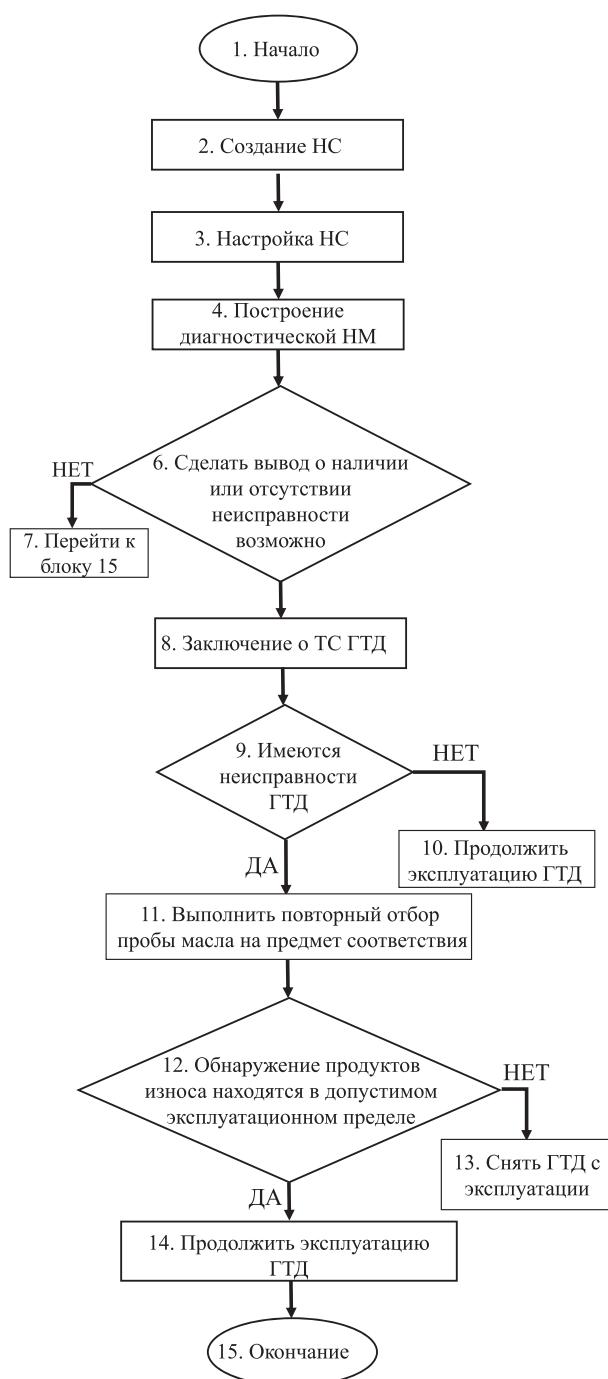


Рис. 5. Обобщенный алгоритм применения НС для диагностики ГТД

ГТД целесообразно выбрать следующие:

- расход масла по изменению его уровня в баке;
- давление масла на входе в двигатель;
- температура подшипников;
- температура масла на выходе из двигателя.

Эти параметры контролируются постоянно в полете и в то же время необоснованные скачки их значений будут указывать на нарушения в работе узлов трения.

Далее рассмотрим обобщенный алгоритм применения НС для диагностики ГТД (рис. 5), который включает

следующие этапы [8]:

1. Создание НС. На данном этапе выполняется выбор типа НС в соответствии с характером решаемой задачи и выбираются предварительные параметры НС.

Что касается выбора архитектуры НС, то для решения задачи идентификации ГТД в нейро-сетевом базисе в качестве основных архитектур целесообразно выбрать персепtron и сеть на радиально-базисных функциях (НС РБФ). Такой выбор обоснован многочисленными экспериментальными исследованиями, проведенными в процессе решения задачи идентификации модели ГТД [9].

2. Выбор оптимальных значений параметров НС. На этом этапе выполняется настройка значений параметров НС для обеспечения качества выполнения задачи прогнозирования.
3. Построение диагностической модели исследуемого ГТД. Здесь выполняется построение кривой состояния по полученным на выходе из НС данным.

При построении такой модели целесообразно обосновать взаимосвязь результатов контроля выше перечисленных параметров с экспериментальными данными по качеству масла.

4. Анализ технического состояния ГТД (ТС ГТД) по диагностической модели. Этап включает выявление на модели ГТД характерных признаков и последующий анализ модели с применением графиков-схем состояния ГТД.

По результатам анализа об установлении ТС ГТД выдается заключение, на основании которого ГТД либо допускается к дальнейшей эксплуатации, либо может быть назначен осмотр (отбор пробы масла). По результатам осмотра ГТД либо допускается, либо снимается с дальнейшей эксплуатации.

Таким образом, наша задача заключается в разработке алгоритмов и построении диагностической модели исследуемого ГТД, базирующихся на НС, для прогнозирования технического состояния ГТД.

Заключение

В настоящей работе проведен анализ используемых методов диагностики авиационных двигателей. Показано, что наиболее перспективной и надежной является трибодиагностика, основанная на комплексном подходе.

На основании анализа экспериментальных данных построена статистическая модель исправного двигателя Д-30КП-2, показывающая, что все полученные значения не превышают границ критического износа, следовательно, исследуемые двигатели могут быть допущены к эксплуатации без ограничений.

Предложен обобщенный алгоритм применения НС для прогнозирования технического состояния ГТД.

Разработка прогнозной модели работоспособности авиационного двигателя на основе интеллектуального анализа экспериментальных данных позволит обосновать переход к проведению необходимого технического обслуживания по фактическому состоянию двигателей.

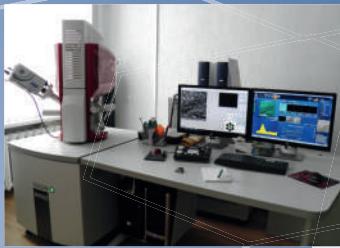
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Машошин, О.Ф. Диагностика авиационных газотурбинных двигателей с использованием информационного потенциала контролируемых параметров : дис. ... доктора техн. наук : 05.22.14: / О.Ф. Машошин. – М., 2005. – 233 с.
2. Грядунов, К.И. Метод обеспечения достоверности диагностирования авиационных двигателей по содержанию металлов в маслах : дис. ... канд.техн.наук : 05.22.14: / К.И. Грядунов. – М., 2016. – 139 с.
3. Дасковский, М. И. Эффективность комплексного применения различных методов трибодиагностики при эксплуатации двигателя ПС-90А / М. И. Дасковский, О. Ф. Машошин // Научный вестник МГТУ ГА. – 2012. – № 178. – С. 115-123.
4. Жукова, А.А. Мониторинг авиационного двигателя на наличие металлических примесей в масле / А.А. Жукова, Е.А. Шапорова, С.О. Стойко // Вестник БелГУТа: наука и транспорт. – 2021. – № 1 (42). – С. 48-51.
5. Шапорова, Е.А. Трибодиагностика как метод перехода на техническое обслуживание по состоянию / Е.А. Шапорова, [и др.]. // Гражданская авиация на современном этапе развития наука, техники и общества: международная научно-техническая конференция, посвященная 50-летию МГТУ ГА, Москва, 25-26 мая 2021 г/ редкол.: Б.П. Елисеев (гл. ред) [и др]. – М., 2021. – С. 44-46.
6. Рашка, С. Python и машинное обучение / С. Рашка // Тренировка алгоритмов машинного обучения для задачи классификации : пер. с англ. А.В. Логунова. – Москва, 2017. – Гл.2. – С. 47.
7. Легконогих, Д.С. Применение нейросетевых технологий в системах диагностики авиационных силовых установок / Д.С. Легконогих // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14, № 4 (2). – С. 639-643.
8. Раков, П.И. Совершенствование процесса диагностирования узлов проточной части авиационных ГТД типа ПС-90А в условиях эксплуатации применением нейро-сетевых методов : автореф. дис. ... канд. техн.наук : 05.22.14 / П.И. Раков. – М., 2009. – 19 с.
9. Жернаков, С.В. Алгоритмы контроля и диагностики авиационного ГТД в условиях бортовой реализации на основе технологии нейронных сетей / С.В.Жернаков // Вестник УГАТУ. – 2012. – Т. 14, № 3(38). – С. 42-56.
1. Mashoshin, O.F. Diagnostics of aviation gas turbine engines using the information potential of controlled parameters: dis.... doctors tech.Sciences: 05.22.14 / O.F. Mashoshin. – M., 2005. – 233 p.
2. Gryadunov, K.I. Method of ensuring the reliability of diagnostics of aircraft engines by the content of metals in oils: dis. ... Candidate of Engineering Sciences: 05.22.14: / K.I. Gryadunov. – M., 2016. – 139 p.
3. Daskovskiy, M.I. Efficiency of complex application of various tribodiagnostic methods during operation of PS-90A engine / M.I. Daskovskiy, O.F. Mashoshin // Scientific Bulletin of MSTU GA. – 2012. – No. 178. – P.115-123.
4. Zhukova, A.A. Monitoring of an aircraft engine for the presence of metallic impurities in oil / A.A. Zhukova, E.A. Shaporova, S.O. Stoiko // Bulletin of BelSUT: Science and Transport. - 2021. - No. 1 (42). - P.48-51.
5. Shaporova, E.A. Tribodiagnostic as a method of transition to maintenance by state / E.A. Shaporova, [at all/] // Civil aviation at the present stage of development of science, technology and society: an international scientific and technical conference dedicated to the 50th anniversary of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, May 25-26, 2021 / editorial board: B.P. Eliseev (chief editor) [and others]. – M., 2021. – P. 44-46.
6. Raska, S. Python and machine learning / C. Raska // Training machine learning algorithms for the classification problem: per. from English A.V. Logunova. - Moscow, 2017. - Ch. 2. - P. 47.
7. Legkonogikh, D.S. Application of neural network technologies in diagnostic systems of aircraft power plants / D.S. Lightfoot // Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2012. – T. 14, No. 4 (2). – P. 639-643.
8. Rakov, P.I. Improving the process of diagnosing the nodes of the flow path of aircraft gas turbine engines of the PS-90A type under operating conditions using neural network methods: author. dis. ... Candidate of Engineering Sciences: 05.22.14 / P.I. Cancers. – M., 2009. – 19 p.
9. Zhernakov, S.V. Algorithms for monitoring and diagnostics of an aviation GTE in on-board implementation based on neural network technology / S.V.Zhernakov // Vestnik USATU. – 2012. – T. 14, No. 3 (38). – P. 42-56.

REFERENCES

Статья поступила в редакцию
27.04.2021

**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 камераю, имеющей полную оптической системы, улучшающей соотношение сигнал/шум и сохраняющей компактность прибора.



2. Спектромер GNR Solaris CDD Plus. Лабораторный оптико-эмиссионный спектрометр GNR Solaris CDD Plus в настоящий момент является лучшим в своем классе, значительно превосходя по точности все известные характеристики обусловлены самой большой вакуумной термостабилизацию, и вертикально расположенной характеристики обусловлены самой большой вакуумной термостабилизацию, и вертикально расположенной

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.



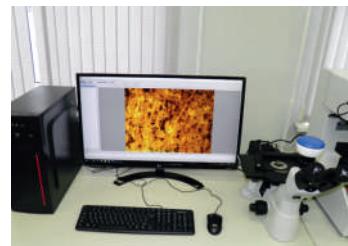
5. 3d-сканер Nikon Altera 7.5.5 с LC15 Dx. Координатно-измерительная машина премиум-класса серии ALTERA, с лазерным сканированием сложных криволинейных поверхностей. Точность сканирования достигается до 1,8 мкм за счёт керамической конструкции с почти идеальной удельной жёсткостью и большой устойчивостью 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.



назначена 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.

$P=UI$
 $I=IA$
 $P=I^2R$
 $(IN)_o = \frac{IN}{i}$
 $I = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}$
 $I = E/R$
 $B = R \frac{I}{d}$
 $B = K \frac{I}{d}$
 $BI = 2\pi r = IN$
 $BI = \mu_0 I$
 $\sum \frac{BI}{\mu} = \sum IN$
 $R = U/I$
 $\epsilon_1 = I_1 R_1 + IR$
 $\omega = \rho t = UI/c\rho t$
 $I = 2\pi r$
 $\epsilon = M_o i / A$
 y
 x
 $a+b=c$

ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 796012.68

В.И. ШАЛУПИН, И.А. РОДИОНОВА

МЕТОДИКА ПЛАНИРОВАНИЯ УЧЕБНЫХ ЗАНЯТИЙ ПО ФИЗИЧЕСКОЙ КУЛЬТУРЕ СО СТУДЕНТАМИ ВУЗОВ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ В НЕДЕЛЬНОМ УЧЕБНОМ ЦИКЛЕ

Владимир Ильич Шалупин – кандидат педагогических наук, профессор, заслуженный работник физической культуры РФ, заведующий кафедрой физического воспитания Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации», Российской Федерации
v.shalupin@mstuca.aero

Инесса Альбертовна Родионова – кандидат педагогических наук, профессор, отличник физической культуры и спорта, профессор кафедры физического воспитания Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации», Российской Федерации
rodiinna@mail.ru

Vladimir Shalupin – Candidate of Pedagogical Sciences, Professor, Honored Worker of Physical Culture of the Russian Federation, Head of the Department of Physical Education of Moscow State Technical University of Civil Aviation, Russian Federation
v.shalupin@mstuca.aero

Инесса Альбертовна Родионова – Candidate of Pedagogical Sciences, professor, excellent student of physical education and sports, Professor of the Department of Physical Education of Moscow State Technical University of Civil Aviation, Russian Federation
rodiinna@mail.ru

Аннотация: в работе показана реакция организма учащихся на типичные занятия, проводимые в начале и конце недели по физической культуре в вузе, неадекватность изменения динамики психофизиологических параметров организма студентов во время занятий по физической культуре.

Ключевые слова: учебные занятия в вузе, физические упражнения, физическая культура, методика проведения, психофизиологические параметры, самочувствие, активность, настроение, таблица Шульте.

Abstract: the work shows the reaction of the body of students to typical physical culture lessons at the beginning and end of the week at the university, the inadequacy of changes in the dynamics of psychophysiological parameters of the body of students during physical education lessons.

Keywords: studies at a university, physical exercises, physical culture, methodology, psychophysiological parameters, well-being, activity, mood, Schulte table.

Учебные занятия являются наиболее экономичным и эффективным способом организации систематических физических упражнений, особенно когда необходимо обеспечить упорядоченное формирование знаний, и строго

влиять на развитие двигательных навыков и когнитивных способностей. Все другие формы вне учебных занятий не могут сравниться с работой под руководством преподавателя, в «живом» общении со студентом. Поэтому, несмотря

на то, что некоторые мероприятия, такие как индивидуальная физическая тренировка, массовая спортивная работа и т.д., по своим параметрам (объему, интенсивности нагрузок, количеству занятий в неделю), могут превосходить

стандартное учебное занятие, они все же остаются второстепенными: личный пример педагога и его знания в области физической культуры формируют сильную мотивацию и дают импульс к занятиям.

Учебные занятия по дисциплине «Физическая культура», на наш взгляд, являются одними из основных предметов обучения и воспитания студентов в вузах гражданской авиации, т.к. эти мероприятия являются основой физического и духовного здоровья, на базе которого только и возможно разностороннее развитие личности профессионала. Это одна из немногих дисциплин, которая формирует у студентов грамотное отношение к себе, к своему телу, способствует воспитанию морально-волевых качеств, потребности в укреплении здоровья и дальнейшего самосовершенствования. Перед современным обществом стоит задача создания и развития новой образовательной системы. И не последнюю роль в ней будет играть инновационная система физического воспитания и спортивной подготовки, задача которой вырастить не только физически сильного, но и волевого человека, способного противостоять вызовам современного мира [6].

В работе А.М. Волковой, А.А. Голубева, В.В. Евсеева показано: «высокий уровень функционирования всех систем организма в значительной степени определяет эффективность летной деятельности, обеспечивает надежность работы инженерно-технического состава» [1]. Планирование занятий, рациональный подбор физических упражнений, использование правильных методов физической культуры, с учетом будущей профессиональной деятельности, на сегодняшний день весьма актуально в учебном процессе вузов гражданской авиации. Выбор физических упражнений – это очень сложный процесс физического воспитания, который повышает профессиональную работоспособность учащихся. При планировании занятий необходимо учитывать особенности экономических и бытовых условий, режим труда и отдыха, типовые свойства психофизиологического состояния

студентов, их физическое развитие и функциональное состояние в конкретный период обучения, а также адекватность реакций на определенные нагрузки. На этой основе составляется содержание занятий по физической культуре, подбираются соответствующие методы обучения.

Формирование здорового образа жизни молодежи и особенно работников гражданской авиации, через развитие физической культуры и спорта, имеют исключительно важное значение [5].

Учебные занятия по физической культуре, в вузах гражданской авиации, являются основной формой образовательного процесса. «Основная направленность занятий заключается в том, чтобы увеличить диапазон функциональных возможностей организма человека, расширить арсенал его двигательной координации, а также обеспечить эффективную адаптацию организма к различным факторам трудовой деятельности» [7].

Важной составляющей учебного занятия в недельном учебном цикле является вопрос активизации двигательного режима и рационального использования средств физической культуры.

Прежде чем приступить к проведению занятий по дисциплине «Физическая культура», необходимо составить план недельного цикла занятий. В плане необходимо учесть: задачи, решаемые в конкретном цикле проведения занятий, теоретическое сопровождение, подбор средств физической культуры, с учетом профессиональной направленности будущих работников авиационной отрасли, объем и интенсивность выполнения физических упражнений с учетом подготовленности контингента. Важно методически правильно оформить занятия, использовать вариативный подход к требованиям выполнения упражнений и последовательности их реализации [4].

Задачи исследования

1. Определить особенности недельной динамики психофизиологических показателей организма студентов различных специальностей и направлений

2. Подготовки.
2. Обосновать методику построения учебного занятия по физической культуре, в зависимости от специфики профессиональной направленности будущих специалистов авиационной отрасли.

Организация исследования

В Московском государственном техническом университете гражданской авиации (МГТУ ГА) проводились исследования особенностей методики планирования занятий по физической культуре в недельном учебном цикле. В педагогическом эксперименте участвовало 3 учебные группы второго курса обучения в количестве 59 студентов, первой и второй медицинской группы (основное и подготовительное отделения).

Исследования проводились в естественных условиях образовательного процесса, в соответствии с расписанием учебных занятий (два раза в неделю) по дисциплине «Физическая культура».

Методы исследования

Использовались следующие методы исследования: тесты-задания для определения устойчивости внимания и динамики работоспособности с использованием таблицы Шульте, психологический тест «Самочувствие, активность, настроение» (САН) для оценки эмоционального самочувствия, определение значений ЧСС в процессе учебной деятельности.

Результаты исследования

Нами была сделана выборка тех групп обучения, где занятия по физической культуре менялись в течение всего года обучения в учебном расписании, чтобы можно было замерять исследуемые параметры в начале, в середине и в конце недельного цикла. В первой группе, согласно расписанию, занятия проводились по схеме вторник – четверг. Во второй группе режим занятий: понедельник – пятница. В третьей группе режим занятий: среда – пятница.

Каждый студент обследовался 4 раза в начале недельного цикла (занятия проводились по расписанию

в понедельник — вторник), далее 4 раза в середине недельного цикла (занятия проводились по расписанию в среду — четверг), далее 4 раза в конце недельного цикла (занятия проводились по расписанию в четверг — пятницу). Причем обязательным условием было максимальное разделение исследований по дням недели.

Студенты этих групп в течение одного года обучения перед занятием физической культурой проходили тестирование для определения устойчивости внимания и динамики работоспособности с использованием таблиц Шульте. Испытуемому поочередно предлагается пять таблиц, на которых в произвольном порядке расположены числа от 1 до 25. Испытуемый отыскивает, показывает и называет числа в порядке их возрастания. Проба повторяется с пятью разными таблицами [2]. Студентам выдавали перевернутый лист бумаги, и по команде обучаемые приступали к выполнению теста и одновременно с началом выполнения задания включался секундомер. Дополнительно, в это занятие они проходили тест САН. Мы давали ссылку на электронный сайт, где размещен этот тест. Тест САН измеряет текущее самочувствие, активность и настроение респондента. Полученная по каждой шкале сумма оценок находится в пределах от 10 до 70 и позволяет выявить функциональное состояние индивида в данный момент времени по принципу: < 30 баллов — низкая оценка; 30 — 50 баллов — средняя оценка; > 50 баллов — высокая оценка [3].

Анализ результатов проведенных исследований показал неоднозначность динамики психофизиологических и психологических параметров реакции организма студентов на нагрузку в недельном цикле учебных занятий.

В начале недели наблюдались в целом оптимальные данные психофизиологических и психологических обследований.

В середине недели эти показатели заметно ухудшались, особенно по результатам тестов САН и Шульте. Ухудшались и пульсовые реакции.

В конце недели показатели теста Шульте улучшались, при том,

Таблица — Динамика исследуемых параметров реакции организма студентов на учебную нагрузку в недельном цикле

Методы исследования	В начале недели	В середине недели	В конце недели
Таблица Шульте (в сек.)	23,93	18,12	32,15
Показатели теста САН «С» — самочувствие (в баллах)	41,45	51,38	29,36
Показатели теста САН «А» — активность (в баллах)	42,18	54,51	25,56
Показатели теста САН «Н» — настроение (в баллах)	37,65	42,91	33,45
Показатели ЧСС в состоянии покоя (уд/мин.)	148±1,56	136±0,82	154±1,24

что пульсовые характеристики говорили о мобилизации энергии в виде адекватных реакций на нагрузку.

Следовательно, высокая вариабельность показателей центральной нервной системы и способ адаптации сердечно-сосудистой системы к учебной нагрузке студентов указывает на необходимость планирования недельного цикла занятий с учетом основных параметров организма. Тип изменений в недельном цикле свидетельствует об улучшении регуляторных механизмов активности организма в середине недели и

снижение всех показателей к концу недельного цикла (таблица).

Чтобы проверить предложение, был проведен педагогический эксперимент для обоснования принципа дифференцированного использования физических упражнений в еженедельном занятии со студентами. Содержание типичного занятия: гимнастика и беговые упражнения. Интенсивность нагрузки варьировалась от 130 до 160 ударов в минуту, в зависимости от частоты сердечных сокращений, и относительной плотности занятия — от 75 до 85 %. Измерение частоты сердеч-

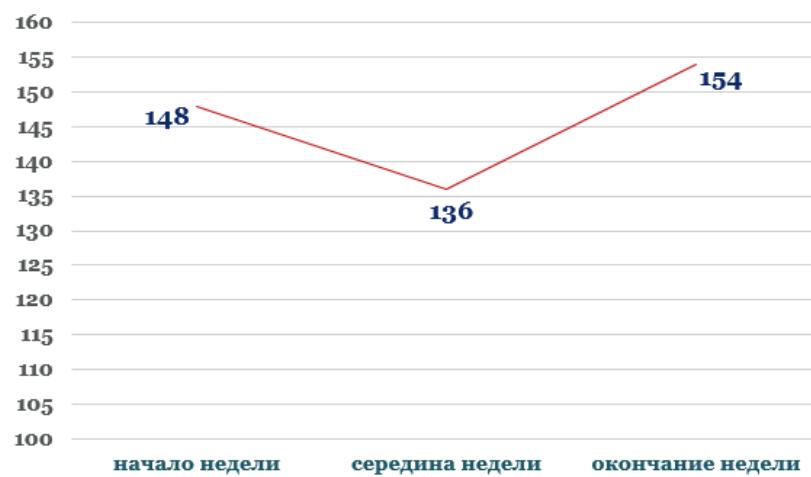


Рис. 1. Динамика показателей частоты сердечных сокращений в покое в течение недели (уд./мин.)

ных сокращений (ЧСС) проводилось при максимальной физической нагрузке в основной части занятия с использованием одних и тех же физических упражнений одинаковой мощности. Кривая ЧСС, записанная в процессе недельного цикла учебных занятий, говорит о реакции организма на физическую нагрузку в зависимости от адекватности и методической коррекции системы упражнений (рис. 1).

Реакция организма учащихся на типичные занятия, проводимые в начале недели, показала оптимально высокие характеристики ЧСС. В средине недели эти показатели снизились. В конце учебной недели те же занятия, с той же интенсивностью показали высокую ЧСС. Следовательно, мы можем говорить об «усталости» организма, т.к. произошло снижение концентрации зрительного анализатора, памяти, внимания, мышления, адекватности реакции организма на физическую нагрузку и т.д.

Заключение

Изменчивость психофизиологических и психических функций, в недельном цикле, указывает на желательность использования сложных физических упражнений в начале и в середине учебной недели. В конце недели, по-видимому, необходимо использовать нагрузки средней и низкой интенсивности с эмоциональным компонентом для корректировки нервно-эмоционального состояния. Тем не менее, вопросы об идеальном содержании инструментов учебного занятия по физической культуре со студентами в недельном цикле, требуют дальнейшего изучения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Volkova L.M. Самостоятельные занятия физическими упражнениями и самоконтроль студентов авиационных вузов. Тексты лекций / Л.М. Volkova, А.А. Голубев, В.В. Евсеев. – СПб, 2018. – 53 с.
2. Все профессиональные тесты. Методика «Таблицы Шульте» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vsetesti.ru/cat/tests/>.
3. Журнал о практической психологии Experimental Psychic [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://experimental-psychic.ru/test-san/>.
4. Моршинина, Д.В. Роль физических упражнений в психологической подготовке студентов учебных заведений гражданской авиации / Д.В. Моршинина, В.И. Шалупин // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2010. – № 162. – С. 172-175.
5. Моршинина Д.В., Карпушин В.В., Шалупин В.И. Ценностные аспекты профессионально-прикладной физической подготовки в процессе обучения специалистов гражданской авиации / Д.В. Моршинина, В.В. Карпушин, В.И. Шалупин // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2013. – № 192. – С. 130-133.
6. Подготовка педагога дополнительного образования в области физической культуры: психологическое сопровождение в детско-юношеском спорте / под общ. ред. А.В. Родионова. – М.: Издательство «Юрайт», 2020. – 251 с. – (Сер. 68 Профессиональное образование).
7. Физическая культура в образовательных учреждениях гражданской авиации / под редакцией В.И. Шалупина. – М.: ИД Академии Жуковского, 2017. – 484 с.

REFERENCES

1. Volkova L.M., Golubev A.A., Evseev V.V. Self-study of physical exercises and self-control of students of aviation universities. Texts of lectures. – SPb, 2018. – P.53.
2. All professional tests [Electronic resource]. Methodology "Schulte Tables" – Access mode: <https://vsetesti.ru/cat/tests/>, free – (03.01.2021).
3. Journal of Practical Psychology Experimental Psychic [Electronic resource]. – Access mode: <https://experimental-psychic.ru/test-san/>, free – (10/17/2020).
4. Morschinina DV, Shalupin VI. The role of physical exercises in the psychological preparation of students of educational institutions of civil aviation. – M.: Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, 2010. No. 162. – P.172-175.
5. Morschinina DV, Karpushin VV, Shalupin VI. Valuable aspects of professionally applied physical training in the process of training civil aviation specialists. Moscow: Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation. 2013.No 192. S. 130-133.
6. Training of a teacher of additional education in the field of physical culture: psychological support in children and youth sports. Textbook under vol. ed. A.V. Rodionova – M.: Yurayt Publishing House, 1st ed.- Ser. 68 Vocational education. – 2020-251 p.
7. Physical culture in educational institutions of civil aviation. Textbook edited by V.I. Shalupin. M.; ID of the Zhukovsky Academy. 2017. – 484 p.

Статья поступила в редакцию
17.02.2021

UDC 378.147

O. PETROVSKAYA, I. RAZUMNIK,
YU. TSYBUKOVA, A. PETROVSKAYA

IMPLEMENTATION OF MODELS OF BLENDED LEARNING IN THE EDUCATIONAL PROCESS FOR GENERAL PROFESSIONAL DISCIPLINES

Ольга Георгиевна Петровская – председатель цикловой комиссии общепрофессиональных дисциплин отделения среднего специального образования учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
p-og97@mail.ru

Ирина Альфредовна Разумник – преподаватель цикловой комиссии общепрофессиональных дисциплин отделения среднего специального образования учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
irina.razumnik@mail.ru

Юлия Петровна Цыбукова – преподаватель цикловой комиссии общепрофессиональных дисциплин отделения среднего специального образования учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
Vasa2009@tut.by

Анна Дмитриевна Петровская – преподаватель-стажер цикловой комиссии общепрофессиональных дисциплин отделения среднего специального образования учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
a.petrovskaya@internet.ru

Olga Petrovskaya – Chairman of the cyclic commission of general professional disciplines of the Department of secondary specialized education of Belarussian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
p-og97@mail.ru

Irina Razumnik – Teacher of the cyclic commission of general professional disciplines f the Department of secondary specialized education of Belarussian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
irina.razumnik@mail.ru

Yulia Tsibukova – teacher of the cyclic commission of general professional disciplines f the Department of secondary specialized education of Belarussian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
Vasa2009@tut.by

Anna Petrovskaya – Trainee teacher of the cyclic commission of general professional disciplines f the Department of secondary specialized education of Belarussian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
a.petrovskaya@internet.ru

Аннотация: в работе показана реакция организма учащихся на типичные занятия, проводимые в начале и конце недели по физической культуре в вузе, неадекватность изменения динамики психофизиологических параметров организма студентов во время занятий по физической культуре.

Ключевые слова: учебные занятия в вузе, физические упражнения, физическая культура, методика проведения, психофизиологические параметры, самочувствие, активность, настроение, таблица Шульте.

Abstract: the article analyzes the features of the application of innovative technologies of the blended learning system in the educational process of institutions of secondary specialized and higher education. The stages of development of educational technology are considered, the characteristics of the application of the main modules are given on the example of general professional disciplines.

Keywords: blended learning, educational process, general professional disciplines, modules, online learning.

The development and improvement of vocational education is currently inextricably linked with the processes of globalization of society, changes in the pace of development of computer

technology and the requirements of customers.

Educational processes are undergoing fundamental changes at all levels of the educational paradigm. It should be noted that

classical education is going through a deep crisis caused by the following main factors:

- lagging behind the knowledge acquired by students from the level of technology development;

- *the inertia of educational programs to rapidly changing socio-economic conditions.*

These transformations acquire special significance at the stage of secondary specialized and higher education, when the learning processes acquire a pronounced professional accent.

In the educational space of all specialties, a number of disciplines are distinguished that belong to general professional. The cycle of general professional disciplines is characterized by a wide range of providing polyprofessional knowledge and skills. It is the basis on which, subsequently, a system of professionally oriented knowledge from a cycle of special disciplines is superimposed.

The close relationship with the technologies of teaching natural science and mathematical cycles makes it possible to implement the requirements of a systemic study of objects in the process of engineering education. The organization of the educational process in the disciplines of the cycle of general professional disciplines begins with the development of their content and includes:

- *setting goals and determining the level of professional tasks;*
- *determination of the branch of scientific knowledge, on the basis of which it is possible to form the ability to solve professional problems of a given level;*
- *preliminary development of the theoretical part of the disciplines based on the scheme for the formation of solutions to professional problems;*
- *concise development of the content of the discipline (drawing up a thematic plan of lectures, practical and laboratory work with an indication of their goals, independent work and assessment of the complexity of training, determination of teaching and control methods);*
- *development of methodological support of the educational process, etc.*

In the modern educational space, these steps are undergoing significant changes. Now, several educational concepts have been formed, which have come to replace the technologies of traditional education. In the environment of

university education, the University 3.0 model is being actively introduced, the founders of which are US universities. According to this model, the goal of the education process is radically changing: from providing information to creating conditions for the development of new knowledge and products on their own, their transfer and commercialization. At the same time, the role of the teacher is not only the translation of ready-made knowledge, but the design of new forms of education and teaching. The teacher acts as a coordinator and curator of the process of transferring knowledge, including between cadets, then departs from the functions of a mentor, which allows you to create a new level of knowledge [1].

The implementation of the "University 4.0" model, based on digital transformation in the education system, is also being actively promoted. A number of leading universities: Swinburne University of Technology (Australia), University of Portsmouth (UK), Danish Technical University (Denmark) and others, successfully and effectively apply authentic technologies and methods, digital tools and types of formative assessment for blended and online learning in educational practice.

In the Republic of Belarus in 2019, the "Concept of digital transformation of processes in the education system of the Republic of Belarus for 2019–2025" was adopted, which lays the foundation for digital transformation of processes in the education system, including the modernization of the infrastructure of the education system, the introduction of breakthrough technologies in the educational process, as well as optimization and digitization with the help of software of all processes occurring in the education system and implemented on the basis of making technical, software, methodological and regulatory decisions.

The Concept notes that a number of major trends in the field of digital transformation of processes in the education system are currently observed in the world: the use of augmented, virtual and mixed realities; the use of digital user devices in the classroom; creation of

a transformable workspace; use of artificial intelligence; personalization of the educational process, etc.

Main part

The prerequisites for the formation of the technology of Blended Learning appeared in the 80s of the 20th century, with the creation of the "Videoplase" project by the American computer artist Myron Kruger – an interactive controlled environment, the prototype of the gamified learning process. The concept of blended learning technology was refined until 2006, and transformed into the definition of the phrase "blended learning" as a combination of face-to-face learning with computer-guided learning or "a range of possibilities presented by combining the Internet and electronic media with forms requiring physical co-presence in the classroom of the teacher and students."

Today, the term "blended learning" means the integration of traditional and innovative (electronic and mobile) forms of education, where these components can have the following ratios: from 50% – 50 to 20% – 80% or more, which imposes serious obligations on the level development of digital competencies of the teacher [2]. The teacher exercises control, guides, advises, based on the entire spectrum of the cadet's needs.

The Clayton Christensen Institute for the Study of Blended Learning (USA) defines blended learning as an educational technology that combines traditional classroom teaching with a teacher; online learning, which assumes that the cadet at least partially controls his own path, time, place and pace of learning; integrating the learning experience in these two environments [3, 4].

In some studies, the possibilities of blended learning are considered from the standpoint of increasing the importance of learning itself at the personal and social level [5]. In other works, aspects of the influence of modern information and communication technologies are studied, which make it possible to organize relatively easy access to knowledge in various fields outside educational organizations [6]. This

approach provides universities with the opportunity to transform existing teaching methods and pedagogical technologies, which will allow students to acquire new knowledge in interaction with other subjects of the educational process. This provides additional opportunities for understanding educational information in a specific context, which correlates with the ideas of the context-activity approach in education [7, 8]. This creates a need for a more flexible information educational environment that allows students to acquire knowledge at any access point, at any time and at their own educational pace.

It is blended learning in this context as the integration of full-time education with technologies of distance support of the educational process that becomes the answer to the needs of society, since it combines and integrates leading educational strategies with modern information and telecommunication technologies in education. In addition, numerous studies indicate significant benefits and opportunities of blended learning for accelerating the development of skills and competencies in various academic disciplines [9].

In this regard, it is appropriate to quote the words of I.M. Remorenko, the rector of the Moscow City Pedagogical University, with which he spoke in 2016 at the presentation of the book "School Step into Blended Learning", published in Russia under the authorship of N.A. Andreeva, L. Rozhdestvenskaya and B.B. Yarmakov. Here's what he said: "Blended learning is one of the most amazing innovations in recent years. Without any large-scale research, written dissertations, long-term sociological measurements, it nevertheless becomes a school and university reality. A rather modest methodological method turns into a new pedagogical worldview. One can argue or agree in assessments of the scale of the spread of blended learning, its claims to be significant for various pedagogical practices, but the growth of the influence of information technologies on education is difficult not to recognize. We are on the cusp of major qualitative changes, and blended learning is an example".

The main prerequisites for the transition to blended learning were

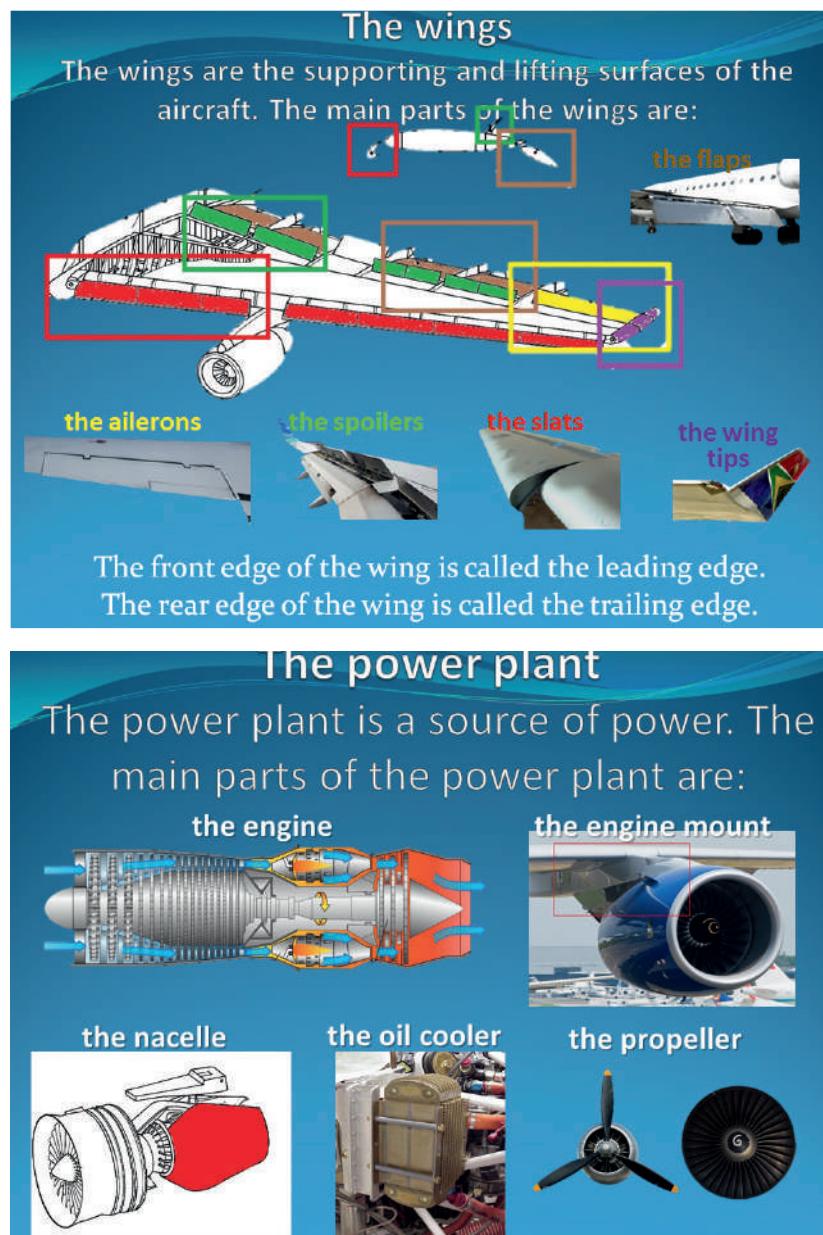


Fig. 1. Pictures on the topic "Airplane parts"

the contradictions in the degree of efficiency of classical educational processes:

- *unwillingness of trainees to independently try to understand the educational material (with blended learning, the teacher has the ability to track the sequence of independent work);*
- *unproductive time spent by the teacher for an intermediate check of the assimilation of the material (in blended learning there is the possibility of automatic checking of control tasks by testing systems).*

Blended learning has three main components:

- *traditional direct personal interaction of participants in the educational process;*
- *interactive interaction through the use of computer technologies and resources;*
- *a high level of self-education.*

There are a number of tasks that allow you to effectively solve the introduction of blended learning into the educational process:

- *expanding the educational opportunities of cadets by increasing the availability and*

- flexibility of education, taking into account their individual educational needs, as well as the pace and rhythm of mastering the educational material;*
- *stimulating the formation of the cadet's subjective position; increasing his motivation, independence, social activity, ability to interact and, as a consequence, increasing the efficiency of the educational process as a whole;*
 - *transformation of the teacher's work style: the transition from the translation of knowledge to interactive interaction with the student, contributing to the construction of students' own knowledge;*
 - *personalization of the educational process, when a cadet independently determines his educational goals, ways to achieve them, taking into account his educational needs, interests*

and abilities.

A number of blended learning models are distinguished. Let's consider the possibilities of their application in the educational process on the example of a number of general professional disciplines [10].

The Rotation model of blended learning is characterized by the alternation of methods of working with educational materials during the passage of an educational program; teaching time is split between one-to-one e-learning and classroom learning, along with the trainer, who also provides remote support for e-learning. For example, when studying the discipline "Economics of an Organization", the process of classroom work can be supplemented by independent online training in an individual mode according to the plan of links on the distance learning platform under test control of the teacher. Especially valuable in this process is that the teacher

can apply the work on adaptive programs - divide the group into 2-3 microgroups, give the task of developing a project to the strongest cadets, and work more closely with the rest. Online control shows the progress of each student and allows you to quickly apply this data during the lesson.

The Flex Model is characterized by the predominant use of e-learning; providing online, offline and face-to-face support for trainees; availability of an individual schedule; work in small groups; organization of group projects; individual training. For example, when studying the discipline "Protection of the population and territory from emergencies", work on creative projects in small groups is applicable, in which the teacher provides assistance to cadets as needed. But the system for implementing the flexible model has gone even further: the student chooses according to which mode the educational process is built. It is possible to study mathematics remotely, "Electrical Engineering with the Basics of Electronics" in a small group, and "Electro-Radio Measurement" one-on-one with a teacher.

The Face to Face Driver model seeks to reinforce traditional face-to-face learning. In the process of studying the discipline "Fundamentals of Technical Mechanics" the teacher personally gives the bulk of the educational material, as necessary, including online training as an auxiliary element.

The A La Carte Model allows the online cadet to decide for themselves which classes will be attended face-to-face. This model can be actively used, for example, in the study of the discipline "Foreign language (professional vocabulary)", when having studied the required amount of linguistic material, the cadet, individually or as part of a group, can participate in a business game on the topic studied (Figure 1).

Also, this model allows you to take lessons from another specialist. The educational institution creates a system of interaction with other institutions or organizations to enable the use of advanced resources. For example, when performing technical translation, it is possible to study online materials provided by an



Fig. 2. Pictures on the topic "Airplane parts" [16]



Fig. 3. Picture on the topic "Exercises with your own body weight and free weights" [17]

industry enterprise.

The creation of the necessary video material should take into account the specifics of cadet learning and, therefore, include the following elements:

- *subtitles in Russian with the ability to turn them on and off (Figure 2);*
- *reading of the material should be carried out by different teachers so that the cadet gets used to perceive different features of diction, as well as reading styles;*
- *multilevel material, so that the cadet can independently choose the difficulty admissible for him at this stage [11].*

Using the A La Carte model in learning a foreign language solves several problems at once: it allows cadets who, for one reason or another, missed classes, to get clarifications on the material; makes it possible, if necessary, to return to these explanations as many times as necessary; increases the communication skills of cadets associated with improving the perception of oral professional speech.

The Flipped classroom model is recognized by foreign and domestic scientists as one of the most effective models of blended learning and is characterized by the fact that the teacher provides cadets with remote access to educational material for their independent study, and during the face-to-face lesson, performing practical tasks on the topic, the knowledge gained is consolidated. Unlike the traditional viewing of an online lecture in class, time is not wasted in the classroom, but the problematic points of

the material already studied are analyzed. Research by P. Shay and T. Bigerano, as well as N. Deschakht and K. Goeman showed that trainees within the framework of this model dropped out of the course less often and showed higher exam scores, in comparison with colleagues who were trained on the basis of the traditional model [12, 13].

The teacher can combine the models at his discretion, depending on the goals and objectives of the discipline. Let us consider the possibility of using the technology of blended learning in the classroom in the disciplines "Physical culture and health" when studying the section of the program "Athletic gymnastics" (Figure 3).

Applying the Flipped classroom model, the teacher provides access to a video resource on the basics of safe behavior in athletic gymnastics classes, demonstrating the technique of performing exercises with weights and own body weight detailed instructions and assignments are attached to the material.

The material allows you to master the exercises, but in view of the individual characteristics of the organism, the level of development of physical qualities and other factors, the student may make mistakes. However, the general structure of movements, the theoretical substantiation of the processes occurring in the body, he is able to master independently. Video viewing allows you to repeat, pause, slow-motion, something that is impossible to do in a training lesson. These processes are of particular importance when working with cadets with deviations

in health. For example, when correcting posture disorders, when it is possible to urgently correct technical defects (Figure 4).

In the online process of studying the assignment, the cadet can ask questions to the teacher, discuss the nuances of the technique in chat with colleagues in the group. You can record your exercise performance on video, and, later, looking through, identify and eliminate errors in technique, comparing them with other records and a reference sample. Also an important factor is the ability to participate in mastering the assignment of cadets who are temporarily exempted from classes for any reason.

Coming later to the lesson, the cadet demonstrates the degree of mastering the educational material and then the teacher can change the model to the "Face to face" model and continue individual lessons or divide the students into microgroups within the flexible model.

Each model is distinguished by the predominance of one of three components of mixed learning technology:

- *direct personal interaction of participants in the educational process.*
- *interactive interaction mediated by computer telecommunication technologies and electronic information and educational resources.*
- *self-education [14].*

The teacher's activity is to coordinate the activities of students both internally and remotely, in a high-tech information and educational environment, building individual educational trajectories; organizing various types of activities using information and educational resources; selection of electronic educational content.

In a blended learning environment, the teacher provides feedback by commenting on the progress and speed of passing the educational material, the success of its implementation thanks to the functionality and information educational environment: videoconferences, forums, chats, etc. In addition, the teacher continuously monitors the educational process and comprehensive analysis of intermediate performance results each student by checking information about the activity of work in the network, the



Fig. 4. Picture support of the posture correction process [18]

quality of control tasks performed in the test form, the number of attempts to complete a particular task, and access to additional educational resources [15].

To improve the effectiveness of blended learning, certain conditions must be met:

1. *Blended learning should be purposeful and have a well-thought-out structure with sequential transitions between different types and types of learning activities.*
2. *The development of blended learning should be based on a systematic approach, including: learning objectives, target audience, learning needs, schedule, technology, learning architecture.*
3. *A system of intermediate and final control of the assimilation of knowledge, the acquisition of skills and abilities is needed; development of online tests, project topics, etc.*
4. *Conducting an analysis of the training needs of the target audience, basic knowledge and skills, experience, preferred learning styles.*
5. *Choosing one of the typical goals of blended learning programs: reaching a larger number of students, increasing the effectiveness of the practical application of the knowledge gained.*
6. *The optimal ratio of types and types of educational activity.*
7. *Construction of different trajectories and training scenarios for different groups of trainees.*
8. *Preparation of documentation and methodological support of the educational process.*

Conclusion

Blended learning is a promising learning system that combines the benefits of traditional and interactive learning. In our opinion, the development of a mixed form of education can become one of the key areas of modernization of the entire educational sphere. The use of blended learning in the system of secondary specialized and higher education provides a number of additional opportunities for achieving maximum efficiency of educational processes:

- *increasing the motivation of cadets' cognitive activity;*
- *the possibility of implementing individual curricula with an unlimited choice of subjects, the level of their development and methods of organizing educational activities;*
- *the possibility of maximum objectification of the assessment procedure and results;*
- *implementation of individual requests for the level of educational achievement using the situation of success;*
- *the possibility of intensifying educational activities in order to save time for the implementation of other educational and cultural needs;*
- *increasing the effectiveness of teaching activities in order to achieve new educational results;*
- *the use of new types of control and communication in the pedagogical*

process;

- *the opportunity to work with highly motivated cadets.*

The most significant postulate in the implementation of the blended learning system is: the main thing is not technology, but the satisfaction of the various needs of cadets and the use of the entire potential of the teacher for their implementation.

REFERENCES

1. Tikhomirova, N. V. Personnel management in an innovative university / N. V. Tikhomirova [et al] // Higher school. – 2011. – No. 2. – P. 3-8.
2. Shchelkunov, M. D. New generation universities / M. D. Shchelkunov // Bulletin of Economics, Law and Sociology. – 2017. – No. 1. – P. 187-192.
3. Horn, B. Michael. Blended Learning [Electronic resource] / Michael B. Horn. – Access mode: <http://www.christenseninstitute.org/key-concepts/blended-learning-2/>. – Date of access: 20.01.20.
4. Melchenkova, N.V. Introducing blended learning to increase the efficiency of teaching English to non-language students / N.V. Melchenkova // Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2015. – Part. 17, №1(5). – P. 1063-1066.
5. Hew, K.F. Using blended learning: evidence-based practices / K.F. Hew, W.S. Cheung. – London: Springer, 2014. – P. 1-15.
6. Akgündüz, D. The impact of blended learning and social media-supported learning on the academic success and motivation of the students in science education / D. Akgündüz, O. Akınoglu // Education in Science. – 2017. – Vol. 42, No. 191. – P. 69-90.
7. Popov, R.I. Theoretical and methodological foundations of methodological training of masters of education in the field of life safety / R.I. Popov. – SPb.: Publishing house of the Russian State Pedagogical University im. A.I. Herzen, 2018. – 127 p.
8. Solomin, V.P. Network forms of university interaction as a way to implement the tasks of pedagogical education development / V.P. Solomin // Universum: Bulletin of Herzen University. – 2014. – No. 3-4. – P. 11-18.
9. Abramova, S.V. Implementation of blended learning in the modern educational process / S.V. Abramova, E.N. Boyarov, P.V. Stankevich // Modern problems of science and education. – 2020. – No. 5. – P. 23-28.
10. Kostina, E.V. Blended learning model / E.V. Kostina // Izvestiya vuzov. Series Humanities. – 2010. – No. 1 (2). – P. 141-144.
11. Kravchenko, A.A. Blended learning as a promising technology in teaching economic theory to foreign students / A. A. Kravchenko [and etc.] // Economic growth of the Republic of Belarus: globalization, innovation, sustainability : materials of the XI Intern. scientific-practical Conf., Minsk, May 17, 2018 / Min/ of Education Resp. Belarus, UO "Belarusian State Economic University". – Minsk : BSEU, 2018. – P. 225-226.

12. Shea, P. Does online learning impede degree completion? A national study of community college students / P. Shea, T. Bidjerano // Computers & Education -2014 – vol. 75. – P. 103-111.
13. Deschacht, N. The effect of blended learning on course persistence and performance of adult learners: A difference-in-differences analysis / N. Deschacht, K Goeman // Computers & Education. – 2015. – vol. 87. – P. 83-89.
14. Nagaeva, I.A. Blended learning in the modern educational process: necessity and opportunities / I.A. Nagaeva // Отечественная и зарубежная педагогика. – 2016. – № 6. – P. 56–67.
15. Krivopalova, I.V. Mixed training as an innovative way of educational sphere modernization / I.V. Krivopalova // Bulletin TGV. – 2013. – T. 18, Part. 1. – P 60-63.
16. How planes fly_ Components and explanation of the Coanda effect [Electronic resource]. - Access mode: https://www.youtube.com/watch?v=Lop9iB6j_Bs - Date of access: 18.01.20.
17. STRONG NATION™ 7 Minutes to Stronger: ARMS + CHEST + BACK [Electronic resource]. - Access mode: <https://youtu.be/c-eRap3wSbc> – Date of access: 20.01.20.
18. Slouching Exercises [Electronic resource].- Access mode: https://youtu.be/Rm8E_-40-ZQ

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тихомирова, Н. В. Управление персоналом в инновационном вузе / Н. В. Тихомирова [и др.] // Высшая школа. – 2011. – №2. – С. 3-8.
2. Щелкунов, М.Д. Университеты нового поколения / М.Д. Щелкунов // Вестник экономики, права и социологии. – Казань. – 2017. – №1. – С.187-192.
3. Michael, B. Horn. Blended Learning [Electronic resource] / Michael B. Horn. - Access mode: <http://www.christenseninstitute.org/key-concepts/blended-learning-2/>. - Date of access: 20.01.20.
4. Мельченкова, Н.В. Внедрение смешанного обучения для повышения эффективности обучения английскому языку студентов, не владеющих языком / Н. В. Мельченкова // Вестник Самарского научного центра РАН, ч. 17,- 2015. – №1 (5) – С. 1063-1066.
5. Hew, K.F., Cheung W.S. Using blended learning: evidence-based practices. Introduction. In K. F. Hew & W. S. Cheung (Eds.), London: Springer, 2014. P.1-15. DOI: 10.1007/978-981-287-089-6_1.
6. Akgündüz D., Akinoglu O. The impact of blended learning and social media-supported learning on the academic success and motivation of the students in science education. Education in Science. 2017.vol. 42. No. 191. P. 69-90.
7. Попова, Р.И. Теоретико-методологические основы методической подготовки магистров образования в области безопасности жизнедеятельности / Р.И. Попов. СПб. : Изд-во Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена, 2018. – 127 с.
8. Соломин, В.П. Сетевые формы университетского взаимодействия как способ реализации задач развития педагогического образования // Universum: Вестник Герценовского университета. – 2014. – № 3-4. – С. 11-18.
9. Абрамова, С.В. Внедрение смешанного обучения в современный образовательный процесс / С.В. Абрамова, Е. Бояров, П. Станкевич // Современные проблемы науки и образования. – 2020. – № 5. – С. 23-28.
10. Костина, Е.В. Модель смешанного обучения / Е.В. Костина // Известия вузов. Серия Гуманитарные науки. – 2010. – № 1 (2). – С. 141-144.
11. Кравченко, А.А. Смешанное обучение как перспективная технология преподавания экономической теории иностранным студентам / А.А. Кравченко [и др.] // Экономический рост Республики Беларусь: глобализация, инновации, устойчивость: Материалы XI Междунар. научно-практической конференции, Минск, 17 мая 2018 г. / Минобразования Респ. Беларусь, УО «Белорусский государственный экономический университет». – Минск: БГЭУ, 2018. – С. 225-226.
12. Shea, P. Does online learning impede degree completion? A national study of community college students / P. Shea, T. Bidjerano // Computers & Education -2014 – vol. 75 - P. 103-111.
13. Deschacht, N. The effect of blended learning on course persistence and performance of adult learners: A difference-in-differences analysis / N. Deschacht, K Goeman // Computers & Education-2015 - vol. 87 - P. 83-89.
14. Нагаева, И.А. Смешанное обучение в современном образовательном процессе: необходимость и возможности / И.А. Нагаева // Отечественная и зарубежная педагогика. – 2016. – № 6. – С. 56–67.
15. Кривопалова, И.В. Смешанное обучение как инновационный путь модернизации образовательной сферы / И.В. Кривопалова // Вестник ТГУ. – Т. 18, ч. 1. – 2013. – С. 60-63.
16. Как летают самолеты_ Компоненты и объяснение эффекта Коанда [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.youtube.com/watch?v=Lop9iB6j_Bs.
17. STRONG NATION™ 7 Minutes to Stronger: ARMS + CHEST + BACK [Electronic resource]. - Access mode: <https://youtu.be/c-eRap3wSbc> - Date of access: 20.01.20.
18. Упражнения от Сутулости [Электронный ресурс]. - Режим доступа: https://youtu.be/Rm8E_-40-ZQ

Статья поступила в редакцию
01.04.2021



ЮРИДИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 341

3.3. ХАЛИЛОВ

КОСМИЧЕСКАЯ ПОЛИТИКА АЗЕРБАЙДЖАНСКОЙ РЕСПУБЛИКИ И ЕЕ ПРАВОВОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

Зафиг Закир Халилов – кандидат юридических наук, доцент кафедры «Правоведение» национальной академии авиации закрытого акционерного общества «Азербайджан Хава Йоллары», Республика Азербайджан zafiq@mail.ru.

Zafiq Khalilov – Candidate of law Sciences, Associate Professor of the Department of Jurisprudence of the National Aviation Academy of the Azerbaijan Hava Yollary Closed Joint Stock Company, Republic of Azerbaijan zafiq@mail.ru.

Аннотация: в статье дается современная geopolитическая характеристика Азербайджана и отмечается, что развитие страны, являющейся региональным лидером на Южном Кавказе, во всех сферах, влияет также и на космический сектор. В целом в статье анализируется историко-правовое развитие превращения Азербайджана в космическое государство, отдаётся предпочтение единому подходу к космосу с учетом многолетнего опыта большинства стран мира, в том числе и Азербайджанской Республики в плане оптимизации структуры и улучшения управления рядом государственных структур. В то же время вносятся важные предложения по усовершенствованию и принятию проекта Закона Азербайджанской Республики «О космической деятельности», регулярно обсуждавшемуся в прессе в течение 2009–2014 годов.

Ключевые слова: Азербайджанская Республика, космическая политика, правовое регулирование, космическое право, космическая отрасль, спутник, Космическое агентство Азербайджанской Республики («Азеркосмос»), Соглашение о Космосе, Закон о космической деятельности.

Abstract: The article gives the modern geopolitical description of Azerbaijan and notes about the development of the country which is a regional leader in the South Caucasus, in all areas also affects the space sector. In general, the article analyzes the historical and legal development of Azerbaijan's transformation into a space state, and a unified approach to space is preferred taking into account the long-term experience of the most countries in the world, including the Republic of Azerbaijan in terms of optimizing the structure and improving the management of a number of government agencies. At the same time, important proposals were made to improve and adopt the draft Law of the Republic of Azerbaijan "On Space Activity", which was regularly discussed in the press during 2009–2014.

Keywords: Republic of Azerbaijan, space policy, legal regulation, space law, space industry, satellite, Space Agency of the Republic of Azerbaijan ("Azercosmos"), The Outer Space Treaty, Space Activities Act.

Благодаря большим достижениям прошлых лет, Азербайджанская Республика, готовящаяся к 30-летию восстановления государственной независимости, сегодня выступает локомотивом Южного Кавказа, решительно отстаивая свои экономические и политические интересы. Сегодня Азербайджан — один из ключевых игроков в регионе, без участия которого невозможна реализация ни одного стратегического проекта в регионе. Реализация на международном уровне под руковод-

ством Азербайджана различных проектов, способных объединить ряд ключевых регионов, еще раз демонстрирует геостратегическую значимость страны. Геополитическая и геоэкономическая активность Азербайджанского государства в регионе и мире, участие региона, Европы и транснационального мира в системах энергетики, транзита, международного транспорта, транспорта и коммуникаций значительно увеличивают его геоэкономический вес среди стран Южного Кавказа.

Если можно так сказать, своей инициативой и практическими шагами Азербайджан заложил фундамент новых транснациональных энергетических проектов. Именно запуск транснациональных проектов в области энергетики, транспорта, коммуникаций и коридоров на Южном Кавказе по инициативе Азербайджана, фактически сделал его лидером в Каспийско-Черноморском бассейне и на Южном Кавказе.

Бесспорным фактом является то, что Азербайджан, будучи лидером в регионе, занял также

позицию государства, «определяющего геополитический курс окружающих стран Южного Кавказа». Современные геополитические характеристики Азербайджана говорят о том, что за короткий исторический период после обретения независимости, страна завершила переходный период, стала сильным региональным геополитическим фактором и выступает в качестве независимого государства в мировой политике, обладая своим положением, мнением и принципиальной позицией. Несомненно, развитие Азербайджана во всех сферах с региональной точки зрения в последние годы повлияло также и на космический сектор и обусловило ее особое место в мире как космической страны. В Азербайджанской Республике постоянно принимаются меры по развитию и правовому регулированию космической отрасли [1 – 7]. На церемонии открытия 71-го Виртуального международного конгресса по астронавтике 12 октября 2020 года, Президент Азербайджанской Республики Ильхам Алиев в своем видеообращении сказал: «Сегодня Азербайджан является членом Космического клуба, и Азербайджан планирует продолжить свою деятельность в этом направлении с 3-мя спутниками. Уверен, что Конгресс, который состоится в нашей столице в 2023 году, придаст дополнительный импульс развитию космической отрасли в нашей стране» [8]. Как видно по этим суждениям, наша страна, современные тенденции развития, стала одним из немногих космических государств в этом направлении. Безусловно, проведение Международного астронавтического конгресса в Баку станет важным инструментом в открытии новых горизонтов для нашей страны в космосе. Похвально, что после ровно полувекового молчания Баку снова примет Международный астронавтический конгресс. Все эти и другие, связанные с этим причины, делают взгляды международного научного сообщества на космическую политику Азербайджанской Республики и ее правовое регулирование весьма актуальными в настоящее время.

Таким образом, актуальность выбранной темы статьи, в первую очередь, обусловлена космической политикой Азербайджанской Ре-

спублики, ее правовым регулированием инесением соответствующих предложений в этом направлении с учетом современных реалий. Несомненно, в наше время вопросы политico-правового регулирования в области космоса стали одной из важных тем в повестке дня каждого государства, в том числе лидера Южного Кавказа – Азербайджанской Республики. Приведенные выше комментарии, определяющие актуальность темы статьи, обусловили необходимость изучения и соответствующего анализа данного вопроса.

Целью статьи является обоснование более целесообразного подхода к вопросам космической политики Азербайджанской Республики и ее правового регулирования, а также внесение предложений в этой сфере. Для достижения этой цели особенно важно решение следующих вопросов:

- *Анализ путей историко-правового развития и превращения Азербайджана в космическое государство с ранних пор по настоящий день;*
- *Оптимизация структуры, улучшение управления и принятие единого институционального подхода в космосе с учетом многолетнего опыта большинства стран мира, в том числе и Азербайджанской Республики.*
- *Усовершенствование и принятие законопроекта Азербайджанской Республики «О космической деятельности», регулярно обсуждаемого в прессе в течение 2009 – 2014 годов.*

Прежде всего, необходимо вкратце взглянуть на путь историко-правового развития нашей страны, которая за последние годы претерпела большое развитие и превратилась в космическое государство. Возникновение национальной космической индустрии совпадает с годами, когда в советское время у власти находился общенациональный лидер азербайджанского народа Гейдар Алиев. Еще на Международном астронавтическом конгрессе, который прошел в Баку 7 – 13 октября 1973 года по инициативе общенационального лидера Гейдара Алиева под девизом «Влияние космических исследований на науку и технологии» приняли участие более 1500 делегатов, а также космонавтов из 17 стран.

Этот конгресс заложил основу истории космонавтики Азербайджана. Как видно, Азербайджан, который 48 лет назад успешно принял 24-й Конгресс астронавтики, оставил неизгладимый след в своей национальной космической истории, благодаря этому историческому событию. Затем, в августе 1974 года, в Баку был создан научный центр «Каспий» для изучения природных ресурсов с использованием космической техники, в декабре того же года был дан старт проведению космических исследований с деятельностью «Специального конструкторского бюро космического приборостроения» Академии наук Азербайджана. С этого времени в Азербайджане начались космические исследования. В последующие годы оборудование, созданное трудом около 3000 азербайджанских ученых и инженеров, послужило Советской космической программе и использовалось в орбитальных комплексах «Салют-7» и «Союз Т-11» [15]. Все это можно рассматривать как основные факторы, определяющие развитие космонавтики в Азербайджане в советский период.

В первые годы независимости нашей страны, х, был в космической сфере, как, кстати, и во всех сферах, наблюдался застой. Тем не менее, необходимо подчеркнуть важность Национального аэрокосмического агентства, созданного в 1992 году и до сих пор активно занимающегося космическими исследованиями. С 2000-х годов стратегической целью Азербайджана стало превращение в государство, имеющее со спутниковой связью. С этой целью 4 ноября 2008 года Распоряжением Президента Азербайджанской Республики Ильхама Алиева «О создании космической отрасли в Азербайджанской Республике и выводе на орбиту телекоммуникационных спутников» были заложены основы современной традиции космической отрасли [4]. Годом позже утвержденная очередным Указом Президента Ильхама Алиева от 17 августа 2009 года «Государственная программа создания и развития космической промышленности в Азербайджанской Республике», определила укрепление и совершенствование существующего потенциала космической отрасли, развитие тех-

нических средств и технологий в космической отрасли.

ОАО «Азеркосмос», первый спутниковый оператор на Южном Кавказе, был учрежден Указом Президента № 885 от 3 мая 2010 года для обеспечения разработки, запуска на орбиту, управления и эксплуатации телекоммуникационного спутника [10]. С тех пор «Азеркосмос» работает над расширением международного сотрудничества в космической отрасли с ведущими государственными агентствами, такими как «Национальный центр космических исследований» Франции (CNES), «Индийская организация космических исследований» (ISRO) и «Национальное космическое агентство» Пакистана (SUPARCO). Данное учреждение сотрудничает с рядом стран в рамках «Комитета по использованию космического пространства в мирных целях» (COPUOS) и «Управления по вопросам космоса» (UNOOSA) Организации Объединенных Наций и других платформ. «Азеркосмос» является членом Международной астронавтической федерации с 2018 года, тем самым получил возможность для налаживания эффективного сотрудничества с ведущими мировыми научными центрами в области космических исследований и совместных исследований [6]. Кроме того, «Азеркосмос» поддерживает тесное космическое сотрудничество с такими странами, как Россия, США, Малайзия, Турция и Беларусь. Указом Президента Азербайджанской Республики от 27 апреля 2021 года на базе открытого акционерного общества «Азеркосмос» было создано Публичное юридическое лицо «Космическое агентство Азербайджанской Республики («Азеркосмос») (далее – Агентство) при Министерстве транспорта, связи и высоких технологий Азербайджанской Республики [17]. Именно этим Указом Агентство считается правопреемником Открытого акционерного общества «Азеркосмос» и продолжает выполнять свои права и обязанности. Похвально, что в настоящее время Агентство обслуживает более 100 компаний примерно в 40 странах.

В результате комплексной деятельности Агентства в рамках международного права проведен

ряд важных работ в части правового регулирования космической деятельности. Следует отметить, что в Азербайджане принят Закон Азербайджанской Республики [2] № 603-IVQ от 19 апреля 2013 года о присоединении к «Соглашению по космосу» от 27 января 1967 года, которое является основным международно-правовым документом в области космоса.

С принятием этого закона была создана важная правовая база для деятельности Азербайджана в этой сфере. Вместе с тем, наша страна за последние годы смогла ратифицировать некоторые международно-правовые документы в этой сфере [4]. За последние годы на орбиту на орбиту выведены три азербайджанских спутника: телекоммуникационный спутник «Azerspace 1», спутник наблюдения «Azersky» и спутник «Azerspace 2». Эти спутники очень важны для географического региона, в котором расположен Азербайджан, и делают большую работу по продвижению страны за рубежом. В результате вот уже 8 лет Азербайджан является полноправным членом мирового «космического клуба», объединяющего ограниченное количество стран со своими спутниками. С другой стороны, это не просто три спутника, а передача высоких технологий Азербайджану. Высоко оценив это членство, Президент Азербайджанской Республики Ильхам Алиев сказал: «Азербайджан является членом космического клуба. Это тоже большое историческое достижение» [12].

Конечно, как космическое государство, Азербайджан, добившийся определенного прогресса в последние годы, также подписал соглашения с рядом стран о сотрудничестве в использовании космического пространства в мирных целях. Также следует учитывать, что Азербайджан – одна из немногих стран, отправивших свои спутники в космос, и многогранная деятельность, проводимая в этом направлении в прошлом, постепенно расширяется. Наглядным примером этого является утверждение Распоряжением Президента Азербайджанской Республики от 15 ноября 2018 года «Государственной программы развития услуг спутникового дистанционного зондирова-

ния в Азербайджанской Республике на 2019–2022 годы». Как видно, наша страна вступила в новый этап развития в формировании современной космической отрасли. В целом, Азербайджан вошел в космическую отрасль через спутниковые службы. Благодаря спутниковым услугам в этой области до сентября 2019 года Азербайджан заработал 165 миллионов долларов на трех своих спутниках. В январе – сентябре 2019 года Агентство получило от коммерческой эксплуатации спутников 30,2 миллиона долларов США, что на 81% больше, чем в соответствующем периоде 2018 года. Это означает, что доходы нашей страны в этой сфере с каждым годом растут [6, 15]. С ноября 2020 года Агентство успешно завершило все этапы «Программы сертификации» World Teleport Association и получило Сертификат Соответствия «Tier 4». Этот сертификат является гарантией качества услуг, предоставляемых оператором телепорта клиентам [1]. Все это свидетельствует о постоянном развитии Азербайджанской Республики в космосе.

Как видно из вышеизложенного, в нашей стране в космическом секторе действуют два агентства: Космическое агентство Азербайджанской Республики («Азеркосмос») и Национальное аэрокосмическое агентство Министерства обороны промышленности.

Прежде всего, вкратце рассмотрим сферу деятельности обоих учреждений. Национальное аэрокосмическое агентство, подчиненное Министерству обороны промышленности Азербайджанской Республики, реализует государственную политику в области освоения космоса и освоения природных ресурсов, разработки национальных программ в этой области, участия в международных космических проектах, применение космических технологий в экономике и безопасность Азербайджана [7].

Космическое агентство Азербайджанской Республики («Азеркосмос») является публичным юридическим лицом, который участвует в формировании и реализации государственной политики в области космической деятельности, выполняет функции государственного и общественного

значения в области регулирования и контроля, запуска, управления и эксплуатации, телекоммуникаций, запуска спутников наблюдения Земли и другого назначения, участвующим в международных космических проектах, сотрудничающим с соответствующими международными организациями и соответствующими государственными органами зарубежных стран в области мирного освоения космоса [17]. В целом деятельность обоих институтов находится в области космоса. С другой стороны, Управление ООН по космическим вопросам (UNOOSA) публикует на своем официальном сайте информацию о национальных космических агентствах растущего числа стран мира [19]. Из этого списка также видно, что ни в одной стране нет двух отдельно действующих космических агентств. Основываясь на развитых странах, все страны имеют единый централизованный орган в этой области — Национальное Космическое Агентство. В этой связи мы должны подчеркнуть уникальный опыт Европейского космического агентства и Австралийского космического агентства [20] в проведении всей космической деятельности через единую организацию. Подобный опыт можно наблюдать практически в любой точке мира (Северная и Южная Америка, Африка, Азия). Конечно, было бы целесообразно применить эту практику и в нашей стране. Отдельно стоит отметить важный момент в связи с подписанием соответствующих международных соглашений по исследуемой проблеме.

Как известно, еще 29 апреля 2003 года было подписано распоряжение Президента Азербайджанской Республики об утверждении «Меморандума о взаимопонимании между Национальным аэрокосмическим агентством Азербайджана и Космическим агентством Румынии о сотрудничестве в использовании и исследовании космического пространства в мирных целях» [13]. Тогда такие меморандумы о взаимопонимании подписывались нашей страной по линии Национального Аэрокосмического Агентства Азербайджана. Подобные соглашения в последние годы подписываются Агентством. Например, можно упомянуть о Соглашении «О сотрудничестве между

Азербайджанской Республикой и Республикой Аргентина в использовании космического пространства в мирных целях», подписанное 12 марта 2014 года в Буэнос-Айресе, Рамочное Соглашение [16] о совместной деятельности в области космоса между «Азеркосмос» и Национальным центром космических исследований Французской Республики, утвержденное Указом Президента Азербайджанской Республики от 26 сентября 2018 года [3]. Конечно, этот момент тоже порождает недоразумение.

В то же время, руководствуясь основным принципом Указа Президента Азербайджанской Республики от 17 января 2019 года «О дополнительных мерах по оптимизации структуры и управления рядом государственных органов в Азербайджанской Республике», целесообразно отдать предпочтение единому институциальному подходу в космосе. С этой точки зрения, принимая во внимание все вышесказанное, мы считаем, что Космическое агентство Азербайджанской Республики («Азеркосмос») и Национальное аэрокосмическое агентство Министерства обороны промышленности могут быть объединены в единый орган на основе многолетнего опыта во всех странах. Название такой единой организации может быть сохранено как Космическое агентство Азербайджанской Республики («Азеркосмос») в соответствии с международной практикой.

В течение 2009 – 2014 годов СМИ регулярно освещали подготовку проекта Закона Азербайджанской Республики «О космической деятельности» и обсуждение этого проекта в различных формах как в государственных органах внутри страны, так и на семинарах за рубежом. Этот проект был разработан с целью организации координации между отдельными государственными и коммерческими организациями, занимающимися космической деятельностью в Азербайджанской Республике, для формирования общих концептуальных принципов [5, 9, 14, 18]. К сожалению, за прошедшие годы не было принято национального законодательства (Закона «О космической деятельности»), которое регулирует государственную политику в области космической

деятельности, отношения, возникающие в этих рамках, и создает правовую основу для устойчивого развития космической сферы в целом. Было бы хорошо, если бы этот законопроект более эффективно отражал коммерческие тенденции современной эпохи в космосе. Предлагаем уделить приоритетное внимание структуре и основным направлениям проекта Типового закона о национальном космическом законодательстве (Draft Model law for National Space Legislation), принятого Ассоциацией Международного Права (ILA – АМП) на Международной конференции по национальному праву «О космической деятельности» в Софии в 2012 году. Азербайджан, как космическое государство с 3-мя спутниками, должен сосредоточить внимание на важных вопросах, связанных с космическими объектами, в рамках соответствующего законодательства, основываясь на законодательном опыте мира в этой области.

С этой точки зрения целесообразнее использовать опыт стран Евросоюза (Испания, Бельгия, Нидерланды, Австрия и др.) и Южной Кореи, которые анализируются в связи с государственной регистрацией космических объектов в Азербайджане. В этой связи для нашей страны особенно важно принятие планов и программ по эффективному использованию космических объектов и управлению ими с учетом опыта Южной Кореи. В то же время, исходя из опыта космического законодательства Южной Кореи, важно реализовывать «проекты развития космоса», которые способствуют освоению космоса в соответствующих областях, таких как образование, технологии, информация, промышленность и другие. Безусловно, реализация такой концепции в будущем национальном законодательстве Азербайджана, которое будет принято в области космоса, и расширение мотивационных условий среди молодежи может принести большую пользу нашей стране как космическому государству. С этой точки зрения необходимо напомнить мнение Президента Азербайджанской Республики Ильхама Алиева, которое содержит стратегию развития для будущего нашей страны и

подчеркивает важность космоса: «Сегодня Азербайджан является членом космического клуба мира и укрепляет свои позиции в мировой космической промышленности. Вывод спутников на орбиту демонстрирует силу нашего государства, нашу политику» [11]. Надеемся, что в ближайшее время будет принят законопроект «О космической деятельности», который может дать большой толчок дальнейшим перспективам развития Азербайджана в космосе и поддержать прогрессивные процессы, происходящие в этом направлении в последние годы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. «Азеркосмос» получил сертификат Tier 4 от World Teleport Association 2 ноября 2020 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://azercosmos.az/media-news/260?lang=az>. – Дата доступа: 20.04.2021.
2. О присоединении к Соглашению о принципах действий государств по исследованию и использованию космического пространства, в том числе Луны и других небесных тел: Закон Азербайджанской Республики, № 603-IVQ, 19 апреля 2013 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: Официальный сайт ОАО «Азеркосмос», <https://www.azercosmos.az/storage/legal-documents/November2018/Tpl1yxICNMAfn4iuQdg.pdf> – Дата доступа: 20.04.2021.
3. О ратификации Соглашения между Азербайджанской Республикой и Республикой Аргентина о сотрудничестве в использовании космического пространства в мирных целях: Закон Азербайджанской Республики, № 1181-IVQ, 13 февраля 2015 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.e-qanun.az/alpidata/framework/data/29/f_29593.html. – Дата доступа: 20.04.2021.
4. Законодательство Азербайджана, международно-правовые документы, официальный сайт Космического агентства Азербайджанской Республики («Азеркосмос»). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://azercosmos.az/about-us-legal-documents?lang=az>. – Дата доступа: 20.04.2021.
5. Законопроект «О космической деятельности» регулирует многие вопросы / Ict news. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ictnews.az/read-25590-news-1.html>.
6. Космическая программа Азербайджана: богатые традиции и современные вызовы / АзерТАдж. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://azertag.az/xeber/Azerbaycanin_kosmik_programi_Zengin_eneneler_ve_muasir_chagirislar-1354437.
7. Министерство обороны промышленности Азербайджанской Республики, Национальное аэрокосмическое агентство (НАА). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mdi.gov.az/az/muessiseler-4/milli-aerokosmik-agentliyi-maka-7>.
8. На церемонии открытия виртуального 71-го Международного конгресса астронавтики представлено видеобращение Президента Азербайджанской Республики Ильхамалиева, 12 октября 2020. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.president.az/articles/42834>.
9. ОАО «Азеркосмос» было представлено на семинаре ООН / Азербайджан [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.azerbaijan-news.az/view-55258/Az%C9%99kosmos-ASC-BMT-nint%C9%99%C5%9Fkil-etdiyi-seminarda-t%C9%99msil-olunub>. – Дата доступа: 26.10.2020.
10. Азеркосмос [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://azercosmos.az/about-us-azercosmos?lang=az>.
11. Президент Азербайджанской Республики Ильхам Алиев поздравил наш народ с выводом на орбиту спутника «Azerspace-2», 26 сентября [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.president.az/articles/30103>.
12. Президент Азербайджанской Республики Ильхам Алиев принял участие в торжественной церемонии, посвященной 96-летию Гейдара Алиева и 15-летию Фонда Гейдара Алиева. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.president.az/articles/33050>.
13. Об утверждении Меморандума о взаимопонимании между Национальным аэрокосмическим агентством Азербайджана и Румынским космическим агентством о сотрудничестве в области мирного использования и исследования космического пространства: Распоряжение Президента Азербайджанской Республики, № 1215, 29 апреля 2003 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.e-qanun.az/framework/2154>.
14. Создание космической отрасли будет способствовать динамичному развитию экономики Азербайджана [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.anLaz/down/meqale/azerbaycan/azerbaycan_avqust2009/88933.html.
15. Спустя полвека гиганты космической индустрии вернулись в Баку: почему они выбрали нашу столицу? анализ, 31 октября 2019 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.aztv.az/index.php/az/news/2614/kosmos-senayesinin-nehengleri-yarim-esr-sonra-yeniden-bakida-niye-mehz-paytaxtimizi-secdiler-marktehlilmark>.
16. Указ Президента Азербайджанской Республики об утверждении Рамочного соглашения о совместной деятельности в области космоса между Открытым акционерным обществом «Азеркосмос» и Национальным центром космических исследований Республики Франция. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.president.az/articles/30123>.
17. Указ Президента Азербайджанской Республики о создании публичного юридического лица «Космическое агентство Азербайджанской Республики («Азеркосмос»)» от 27 апреля 2021 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://president.az/articles/51300>.
18. Халилов, З. З. Теоретические и практические проблемы «свободы воздуха» в международном воздушном праве: автореф. дисс. ... доктора философии по праву: 5603.01: Международное право; права человека / З. З. Халилов. – Баку: Национальная авиационная академия ЗАО «Азербайджан Хава Йоллары», 2014. – 36 с.
19. United Nations Office for Outer Space Affairs (UNOOSA), Worldwide Space Agencies [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/space-agencies.html>.
20. Australian Government Department of Industry, Science, Energy and Resources, Australian Space Agency [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.industry.gov.au/strategies-for-the-future/australian-space-agency>.

REFERENCES

1. Azercosmos received a Tier 4 certificate from the World Teleport Association on November 2, 2020 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://azercosmos.az/media-news/260?lang=az>. – Date of access: 20.04.2021.
2. On accession to the Agreement on the principles of action by states in the exploration and use of outer space, including the Moon and other celestial bodies: Law of the Republic of Azerbaijan, No. 603-IVQ, April 19, 2013 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.'Azercosmos'.az/storage/legal-documents/November2018/Tpl1yxICNMAfn4iluQdg.pdf> – Date of access: 20.04.2021.
3. On the ratification of the Agreement between the Republic of Azerbaijan and the Republic of Argentina on cooperation in the peaceful use of outer space: Law of the Republic of Azerbaijan, No. 1181-IVQ, February 13, 2015 [Electronic resource]. – Mode of access: http://www.e-qanun.az/alpidata/framework/data/29/f_29593.html. – Date of access: 20.04.2021.
4. Legislation of Azerbaijan, international legal documents, the official website of the Space Agency of the Republic of Azerbaijan ("Azercosmos"). [Electronic resource]. – Mode of access: <https://azercosmos.az/about-us/legal-documents?lang=az>. – Date of access: 20.04.2021.
5. The bill "On space activities" regulates many issues / Ict news [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.ictnews.az/read-25590-news-1.html>.
6. Space program of Azerbaijan: rich traditions and modern challenges / AzerTAc [Electronic resource]. – Mode of access: https://azertag.az/xeker/Azerbaycanin_kosmik_proqrami_Zengin_eneneler_ve_muasir_chagirislar-1354437.
7. Ministry of Defense Industry of the Republic of Azerbaijan, National Aerospace Agency (NAA) [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.mdi.gov.az/az/muessiseler-4/milli-aerokosmik-agentliyi-maka-7>.
8. At the opening ceremony of the virtual 71st International Astronautics Congress, a video message from the President of the Republic of Azerbaijan Ilhamaliyev was presented, October 12, 2020 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://ru.president.az/articles/42834>.
9. OJSC "Azercosmos" was represented at the UN / Azerbaijan seminar [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.azerbaijan-news.az/view-55258/Az%C9%99rkosmos-ASC-BMT-nin-t%C9%99%C5%9Fkil-etdiyi-seminarda-t%C9%99msil-olunub>. – Date of access: 10/26/2020.
10. Azercosmos [Electronic resource]. – Mode of access: <https://azercosmos.az/about-us-azercosmos?lang=az>.
11. President of the Republic of Azerbaijan Ilham Aliyev congratulated our people on the launch of the Azerspace-2 satellite into orbit, on September 26 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://ru.president.az/articles/30103>.
12. President of the Republic of Azerbaijan Ilham Aliyev took part in the ceremony dedicated to the 96th anniversary of Heydar Aliyev and the 15th anniversary of the Heydar Aliyev Foundation [Electronic resource]. – Mode of access: <https://ru.president.az/articles/33050>.
13. On approval of the Memorandum of Understanding between the National Aerospace Agency of Azerbaijan and the Romanian Space Agency on cooperation in the field of peaceful use and exploration of outer space: Order of the President of the Republic of Azerbaijan, No. 1215, April 29, 2003 [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.e-qanun.az/framework/2154>.
14. The creation of the space industry will contribute to the dynamic development of the economy of Azerbaijan [Electronic resource]. – Mode of access: http://www.anl.az/down/meqale/azerbaycan/azerbaycan_avqust2009/88933.html.
15. Half a century later, the giants of the space industry returned to Baku: why did they choose our capital? analysis, October 31, 2019 [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.aztv.az/index.php/az/news/2614/kosmos-senayesinin-nehengleri-yarim-esr-sonra-yeniden-bakida-niye-mehz-paytaxtimizi-secdiler-marktehlilmek>.
16. Decree of the President of the Republic of Azerbaijan on the approval of the Framework Agreement on joint activities in the field of space between the Azercosmos Open Joint Stock Company and the National Center for Space Research of the Republic of France [Electronic resource]. – Mode of access: <https://ru.president.az/articles/30123>.
17. Decree of the President of the Republic of Azerbaijan on the establishment of a public legal entity "Space Agency of the Republic of Azerbaijan ("Azercosmos") dated April 27, 2021 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://president.az/articles/51300>.
18. Khalilov, Z.Z. Theoretical and practical problems of "air freedom" in international air law: author. diss.... Doctor of Philosophy in Law: 5603.01: International Law; human rights / Z.Z. Khalilov. – National Aviation Academy CJSC "Azerbaijan Hava Yollary", 2014. – 36 p.
19. United Nations Office for Outer Space Affairs (UNOOSA), Worldwide Space Agencies [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/space-agencies.html>.
20. Australian Government Department of Industry, Science, Energy and Resources, Australian Space Agency [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.industry.gov.au/strategies-for-the-future/australian-space-agency>.

Статья поступила в редакцию
25.05.2021

УДК 656.078

З.В. МАШАРСКИЙ, А.Г. СТАРАНОВИЧ, С.О. СТОЙКО

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ПРАВОВОЙ РЕЖИМ НЕРЕГУЛЯРНЫХ ВОЗДУШНЫХ СООБЩЕНИЙ

Захар Владимирович Машарский – кандидат психологических наук, до-кан факультета гражданской авиации учреждения образования «Белорус-ская государственная академия авиации», Республика Беларусь
aviabsaanir@gmail.com

Анатолий Генрикович Старанович – заместитель декана факультета гражданской авиации учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», Республика Беларусь
staranovich66@mail.ru

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

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

Anatoly Staranovich – Deputy Dean of the Faculty of Civil Aviation of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
staranovich66@mail.ru

Sergey Stoiko – Master of Technical Sciences, Junior Researcher of the Research Laboratory of Belarusian State Academy of Aviation, Republic of Belarus
sergey_14_95@mail.ru

Аннотация: данная статья посвящена вопросу международно-правового регулирования воздушных сообщений. В качестве базовых источников международного воздушного права будут рассмотрены различные соглашения, договоры и конвенции, а также их роль и значение на современном этапе. Особый акцент сделан на нерегулярное воздушное сообщение. Регулирование нерегулярных международных авиаперевозок обычно осуществляется на основе национального законодательства. Нерегулярные международные полеты – разовые полеты гражданских воздушных судов, не занятых в регулярных международных воздушных сообщениях. нерегулярные коммерческие полеты пользуются привилегией принимать на борт или выгружать пассажиров, груз или почту при условии, что любое государство, где производится такая погрузка или выгрузка, имеет право устанавливать такие права, условия или ограничения, какие оно может счесть желательными.

Ключевые слова: воздушные сообщения, нерегулярные рейсы, чартеры, «свободы воздуха», коммерческая деятельность, гражданская авиация.

Abstract: This article is devoted to the issue of international legal regulation of air traffic. Various agreements, treaties and conventions, as well as their role and significance at the present stage, will be considered as the basic sources of international air law. Special emphasis is placed on regular air traffic. The regulation of irregular international air travel is usually based on national legislation. Irregular international flights – one-time flights of civil aircraft that are not engaged in regular international air services. non-scheduled commercial flights enjoy the privilege of taking on board or unloading passengers, cargo or mail, provided that any State where such loading or unloading takes place has the right to establish such rights, conditions or restrictions as it may deem desirable.

Keywords: air services, irregular flights, charters, "air freedom", commercial activity, civil aviation.

Вопросы коммерческой деятельности международного воздушного транспорта в основном связаны с осуществлением регулярных воздушных сообщений. Между тем, в современной авиа-

транспортной отрасли немало- важное место занимают и нерегулярные воздушные сообщения, в отношении которых действует особый правовой режим.

В отличие от регулярных воз-

душных сообщений Чикагская конвенция 1944 г. формально предусматривает определенную свободу при выполнении нерегулярных авиаперевозок. Согласно статье 5 конвенции каждое Договарива-

ющееся государство предоставляет всем воздушным судам других Договаривающихся государств, не занятых в регулярных международных воздушных сообщениях, право транзитных пролетов через его территорию и право посадок с некоммерческими целями, то есть права первой и второй «свобод воздуха». Из самого текста статьи 5, а также из толкования данной статьи, принятого Советом ИКАО, следует, что для осуществления данных прав не требуется получения предварительного разрешения; государства могут потребовать лишь предварительное уведомление о намеченном прибытии для управления воздушным движением, обеспечения санитарного контроля и иных подобных целей. Однако, несмотря на это, на практике большинство государств либо обуславливают полеты иностранных воздушных судов на свою территорию получением специального разрешения соответствующих государственных органов, либо применяют к ним порядок, аналогичный тому, который действует в отношении регулярных полетов (например, заключение специальных двусторонних соглашений). Тем самым, как замечает профессор Ю.Н. Малеев, «формально закрепленная в ст. 5 обязанность государств «мириться» с нерегулярными полетами иностранных воздушных судов на своей территории без получения предварительного разрешения фактически не действует в отношениях между значительным числом стран» [1–4].

В зависимости от практики применения статьи 5 Чикагской конвенции 1944 года государства можно разделить на три основные группы:

1. государства, которые допускают нерегулярные полеты иностранных воздушных судов на свою территорию по дипломатическому уведомлению, минуя процедуру предварительного получения разрешения от компетентных государственных органов;
2. государства, которые применяют в отношении нерегулярных полетов порядок, аналогичный тому, который действует в отношении регулярных воздушных сообщений, и предусматривают в двусторонних соглашениях о воздушном сообщении нормы, касающиеся порядка выполнения нерегулярных полетов;
3. государства, обуславливающие нерегулярный полет иностранного воздушного судна на свою территорию получением специального разрешения от соответствующего государственного органа.

Статья 5 Чикагской конвенции 1944 г. также закрепляет, что воздушные суда, занятые в перевозке пассажиров, груза или почты за вознаграждение или по найму, но не в регулярных международных воздушных сообщениях, пользуются, с учетом положений статьи 7 («Каботаж»), привилегией принимать на борт или выгружать пассажиров, груз или почту при условии, что любое государство, где производится такая погрузка или выгрузка, имеет право устанавливать такие правила, условия или ограничения, какие оно может счесть желательными. Согласно разъяснениям Совета ИКАО, которые он дал еще в 1952 г., эти правила, условия и ограничения могут включать в себя и требование получения иностранным авиапредприятием предварительного (специального) разрешения для принятия на борт или выгрузки пассажиров, грузов или почты, однако право государства устанавливать данные ограничения не должно осуществляться в такой форме, чтобы сделать эксплуатацию нерегулярного воздушного транспорта невозможной или неэффективной.

В настоящее время практически все государства в полной мере используют свое право устанавливать правила, условия и ограничения, включая требования о получении предварительного разрешения, при выполнении авиапредприятиями нерегулярных международных авиаперевозок [5–7].

Условия и ограничения в отношении нерегулярных международных авиаперевозок могут предусматриваться в отдельных, специально посвященных данному вопросу, многосторонних и двусторонних соглашениях, либо в традиционных соглашениях о воздушном сообщении.

Из специальных соглашений по вопросам нерегулярных авиапере-

возок прежде всего следует выделить Многостороннее соглашение о коммерческих правах при нерегулярных воздушных сообщениях в Европе, заключенное государствами — членами Европейской конференции гражданской авиации (ЕКГА). Соглашение применяется к гражданским воздушным судам, которые не заняты в регулярных международных воздушных сообщениях и отвечают следующим требованиям [8, 9]:

- 1) зарегистрированы в одном из государств-членов ЕКГА;
- 2) эксплуатируются гражданином или юридическим лицом одного из Договаривающихся государств, имеющим соответствующее разрешение ком- предоставляется полная свобода при осуществлении авиаперевозок между территориями Договаривающихся Сторон в случаях:
 - а) удовлетворения гуманитарных или чрезвычайных нужд;
 - б) выполнения пассажирских рейсов класса «такси» случайного характера, причем воздушное судно не должно иметь более шести пассажирских мест, пункт назначения должен быть выбран самим нанимателем, и не должна иметь место свободная продажа билетов на оставшиеся незанятые места;
 - в) полетов, когда вся вместимость воздушного судна нанимается одним лицом (гражданином или юридическим лицом) для перевозки своих людей или грузов;
 - г) эпизодических полетов, выполняемых между определенными пунктами не чаще одного раза в месяц;
 - д) грузовых перевозок;
 - е) перевозок пассажиров между районами, не имеющими между собой прямых регулярных воздушных сообщений. В двух последних случаях Договаривающееся государство может отказать в полетах, если оно посчитает, что полеты ущемляют интересы авиакомпаний, эксплуатирующих регулярные воздушные линии.
- Наряду с Соглашением ЕКГА, на сегодняшний день действует также Многостороннее соглашение о коммерческих правах при нерегулярных международных воздушных сообщениях между стра-

нами-членами АСЕАН (Ассоциация государств юго-восточной Азии).

В традиционных межправительственных соглашениях о воздушном сообщении правила и условия в отношении нерегулярных воздушных сообщений, как правило, содержатся в отдельных приложениях, именуемых «Чarterные воздушные перевозки». В этих приложениях государства могут оговаривать коммерческие права, которыми пользуются специально назначенные авиапредприятия при осуществлении нерегулярных авиаперевозок, порядок рассмотрения заявок на чarterные рейсы, применение своих внутренних законов и правил к чarterным перевозкам.

Так, в Приложении II «Чarterные воздушные перевозки» к Соглашению между Правительством Российской Федерации и Правительством США о воздушном сообщении указывается, что авиационные организации одной Стороны, назначенные согласно настоящему Приложению, могут выполнять международные чarterные перевозки пассажиров и/или грузов между любым пунктом или пунктами на территории Стороны, которая назначила авиационная организация, и любым пунктом или пунктами на территории другой Стороны. При выполнении перевозок авиационные организации должны также иметь право: совершать «стоп-оверы» в любых пунктах в пределах либо за пределами территории любой Стороны; выполнять транзитные перевозки через территорию другой Стороны; совмещать на одном воздушном судне перевозку, которая начинается на территории одной Стороны, с перевозкой, начинающейся на территории другой Стороны. Чarterные рейсы должны выполняться в соответствии с правилами чarterных перевозок государства, из которого начинается чarterная перевозка. Если Сторона применяет различные правила, положения, условия или ограничения к одному или нескольким своим авиационным организациям, или к авиационным организациям других стран, то каждая назначеннная авиационная организация должно подпадать под наименее жесткие требования [10, 11].

Необходимо подчеркнуть,

что потребность в подробной регламентации порядка и условий осуществления нерегулярных, и прежде всего чarterных, авиаперевозок, была во многом вызвана сильным ростом в 60-е – 70-е гг. объемов этих перевозок, первоначально носивших вспомогательный и эпизодический характер. Появление реальной угрозы для регулярных воздушных сообщений со стороны нерегулярного воздушного транспорта поставило государства перед проблемой установления равновесия между коммерческими интересами эксплуатантов, выполняющих регулярные полеты, и интересами чarterных эксплуатантов на одних и тех же рынках перевозок. В этой связи государства вынуждены налагать различные ограничения или вводить контроль для того, чтобы нерегулярные воздушные перевозки не подрывали рентабельность и эффективность авиаперевозок, выполняемых на регулярной основе. Такой контроль может включать в себя следующие меры [14 – 15]:

- запрещение осуществления некоторых видов чarterных рейсов (например, чarterных рейсов с предварительным бронированием, чarterных рейсов типа «инклузив тур»);*
- географические ограничения и ограничения маршрутов (например, разрешение на осуществление некоторых видов чarterных рейсов в заранее установленные районы или только на установленных маршрутах);*
- контроль за объемами нерегулярных авиаперевозок (например, в соответствии с российско-американским соглашением о воздушном сообщении общее количество парных рейсов, выполняемых по маршрутам через Северную Атлантику авиационными организациями каждой Стороны, не должно превышать 150 рейсов в год – для пассажирских и комбинированных чarterов, и 80 рейсов в год – для грузовых чarterов; при выполнении полетов назначенные авиационные организации могут использовать любые типы дозвуковых воздушных судов с емкостью менее 500 кресел);*
- контроль за ценами;*

g) *выдача авиационной организации разрешений на нерегулярные авиаперевозки при наличии согласия авиационной организации, выполняющего регулярные международные перевозки по тому же маршруту (например, согласно Распоряжению Министерства транспорта Российской Федерации № АЮ-16-р от 1 февраля 2006 года разрешение на выполнение нерегулярных авиаперевозок на территорию Российской Федерации может выдаваться иностранному эксплуатанту при наличии согласия российской авиационной организации, выполняющего регулярные международные перевозки по заявленному маршруту, если в соответствии с межправительственным соглашением о воздушном сообщении или договоренностями авиационных властей требуется такое согласие).*

Однако по мере дальнейшей либерализации регулирования международных воздушных сообщений введение различных условий и ограничений в отношении нерегулярных авиаперевозок становится все менее необходимым. Профессор Б. Хавел отмечает, что либерализация приводит к стиранию граней между регулярными и нерегулярными воздушными сообщениями с точки зрения их правового регулирования. Так, соглашения об «открытом небе», предусматривающие широкие права для авиационных организаций при выполнении перевозок на регулярной основе, устанавливают практически полную свободу и для нерегулярных перевозок, а, например, Многостороннее соглашение о либерализации международного воздушного транспорта с участием Брунея, Новой Зеландии, Самоа, Сингапура, США, Тонга и Чили, вообще предоставляет одинаковый объем прав для двух видов международных воздушных сообщений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Баталов, А. А. Современное международно-правовое регулирование воздушных сообщений: теория и практика / А. А. Баталов. – М.: ИКД «Зерцало-М», 2018. – 224 с.
2. Верещагин, А.Н. Международное воздушное право / А. Н. Верещагин. – М.: Международные отношения, 2016. – 199 с.
3. Грязнов, В. С. Правовые основы международных воздушных сообщений / В. С. Грязнов, Ю. Н. Малеев. – М.: МИИГА МГА, 2013. – 152 с.
4. Дежкин, В. Н. Правовое регулирование международных воздушных сообщений / В. Н. Дежкин. – М.: Юридическая литература, 2012. – 103 с.
5. Капустин, А.Я. Региональные межправительственные экономические организации освободившихся государств / А.Я. Капустин. – М.: Издательство Университета дружбы народов, 1988. – 137 с.
6. Костромина, Е.В. Экономика авиакомпаний в условиях рынка / Е. В. Костромина. – М.: Авиабизнес, 2012. – 344 с.
7. Майлс, Д. Тень ВТО над «Аэрофлотом» [Электронный ресурс] / Д. Майлс, [и др.] // Ведомости. 2 июля 2016 года. – Режим доступа: <https://www.aex.ru/fdocs/1/2002/7/2/2280/>.
8. Могилевкин, И. Транспорт в прошлом и нынешнем веке / И.Могилевкин // Мировая экономика и международные отношения. – 2017. – № 9. – С. 34-43.
9. Мокроусова, И. Деньги за воздух [Электронный ресурс] / И.Мокроусова // Бизнес &FM. – Режим доступа: <https://www.aviaport.ru/digest/2005/09/14/94930.html>.
10. Актуальные вопросы международного воздушного права / Под ред. А.С. Пирадова. – М.: Международные отношения, 2011. – 200 с.
11. Покровский, Ф. А. Рекомендации и заключения в системе правовых актов Европейского Сообщества / Ф. А. Покровский // Вестник Московского университета. Серия 11 «Право». – 2012. – № 1. – С. 114-122.
12. Талалаев А. Н. Венская конвенция и право международных договоров. Комментарий / А. П. Талалаев. – М.: Юридическая литература, 2017. – 332 с.
13. Талалаев, А. П. Право международных договоров. Действие и применение договоров / А. П. Талалаев. – М.: Международные отношения, 2011. – 135 п.
14. Хартли, Т.К. Основы права Европейского Сообщества / Т. К. Хартли. – М.: ЮНИТИ, 2018. – 647 с.
15. Шумилов, В. М. Международное публичное экономическое право / В. М. Шумилов. – М.: НИМП, 2011. – 384 с.

REFERENCES

1. Batalov A.A. Modern international legal regulation of air communications: theory and practice. - M.: ICD "Zertsalo-M", 2018. - 224 p.
2. Vereshchagin A. N. International air law. M.: Mezhdunarodnye otnosheniya, 2016.-198 p.
3. Gryaznov V., Maleev, Yu. N. The legal framework for international air services. M.: MIIGA MGA, 2013.- 152 p.
4. The Dezhkin V. N. Legal regulation of international air services. M.: Legal literature, 2012.- 103 p.
5. Kapustin A. J. Regional intergovernmental economic organization of the liberated States. M.: Publishing house of peoples' friendship University, 1988.- 137 p.
6. Kostromina E. V. Economy of the airline in the conditions of the market. Moscow: IYU VKSH "Aviabusiness", 2012.- 344 p.
7. Michaels D., Egorova T., et al. The shadow of the WTO over Aeroflot [Electronic resource] // Vedomosti. July 2, 2016. – Mode of access: <https://www.aex.ru/fdocs/1/2002/7/2/2280/>.
8. Mogilevkin I. Transport in the past and present century // World Economy and International Relations. 2017, No. 9, p. 34-43.
9. Mokrousova I. Money for air [Electronic resource] // Business &FM. – Mode of access: <https://www.aviaport.ru/digest/2005/09/14/94930.html>.
10. Current issues of international air law / Pod red. A. S. Piradova. M.: International Relations, 2011. – 200 p.
11. Pokrovsky F. A. Recommendations and conclusions in the system of legal acts of the European Community // Bulletin of the Moscow University. Series 11 "Law". 2012, № 1, p. 114-122.
12. Talalaev A. N. The Vienna Convention and the Law of International Treaties. Comment. Moscow: Legal Literature, 2017.- 332 p.
13. Talalaev A. II. The law of international treaties. Action and application of treaties. Moscow: International Relations, 2011. – 135 p.
14. Hartley T. K. Fundamentals of the law of the European Community. Moscow: UNITY, 2018. – 647 p.
15. Shumilov V. M. International public Economic Law. Moscow: NIMP, 2011. – 384 p.

Статья поступила в редакцию
28.05.2021

ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К СТАТЬЯМ ДЛЯ ОПУБЛИКОВАНИЯ

К публикации в журнале принимаются оригинальные, достоверные и обоснованные материалы, которые имеют научное и практическое значение, отличаются актуальностью и новизной.

Объем текста статьи должен составлять не менее 14 тыс. печатных знаков, но не превышать 30 тыс. печатных знаков (8–14 стр.).

Статья должны быть выполнена в текстовом редакторе MS Word и отредактирована строго по следующим параметрам: ориентация листа – книжная, формат А4, поля по 2 см по периметру страницы, шрифт Times New Roman, размер шрифта для всей статьи, кроме аннотации, ключевых слов и таблиц – 14 пт, размер шрифта для таблиц – 12 пт, размер шрифта для аннотации и ключевых слов – 10 пт, межстрочный интервал – 1.0, выравнивание по ширине страницы, абзацный отступ – 1,25 см (без использования клавиш «Tab» или «Пробел»). Выделения в тексте возможны только полужирным шрифтом и (или) курсивом. Внутренние подзаголовки необходимо центрировать.

В структуру статьи входит:

1. УДК (номер тематической рубрики). Располагается отдельной строкой слева.

2. Название статьи. Должно содержать до 12 слов. Не допускается использовать в названии аббревиатуры и формулы. (Располагается по центру, начертание – полужирное, прямое).

3. Инициалы и фамилия автора (авторов).

4. Аннотация. Рекомендуемый средний объем аннотации составляет 500 печатных знаков, но не более 900, которая должна кратко отражать структуру статьи и быть

информационной.

5. Ключевые слова должны содержать 5–10 слов или 3–5 словосочетаний, которые отделяются друг от друга запятой.

6. Далее в той же последовательности идет блок информации (пункты 2–5) на английском языке. Если статья англоязычная – вышеуказанные данные приводятся на русском языке.

7. Текст статьи, в который также могут входить рисунки и таблицы.

Таблицы набираются в редакторе MS Word. Таблицы должны иметь номера и названия, которые должны быть указаны над таблицами. Единственная таблица в публикации не нумеруется. Использованные в таблице сокращения подлежат расшифровке в конце таблицы.

Графический материал (рисунки, чертежи, схемы, фотографии) должны представлять собой обобщенные материалы исследований. Графический материал должен размещаться сразу же после ее первого упоминания в тексте, а также должен быть предоставлен в хорошем качестве в отдельных файлах в формате .jpg/.png/.cdr/ или .psd (Adobe Photoshop, без склеивания слоев) с разрешением не ниже 300 dpi. Названия и номера графического материала должны быть указаны под изображением. Элементы рисунков и кривые нумеруются курсивными арабскими цифрами, которые расшифровываются в подрисуночных подписях. Единственный рисунок в статье не нумеруется.

Формулы и математические символы. Простые формулы и буквенные обозначения величин нужно вставлять, используя меню

«Вставка. Символ». Сложные формулы набираются с помощью встроенного в MS Word редактора формул MathType. Нумеруются только те формулы, на которые автор ссылается по тексту.

Иллюстрации, формулы и сноски следует пронумеровать в соответствии с порядком цитирования в тексте.

Аббревиатуры. В тексте следует использовать только общепринятые сокращения (аббревиатуры). Полный термин, вместо которого вводится сокращение, следует расшифровывать при первом упоминании его в тексте.

Приводимые статистические данные, факты, цитаты, имена собственные и другие сведения должны быть обеспечены ссылками на источники. В тексте пишутся в квадратных скобках (например, [1]).

8. Список использованных источников должен включать в себя все работы, использованные автором в тексте и оформлен в соответствии с требованиями Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь. Каждый источник должен иметь свой порядковый номер в списке. Количество литературных источников – 10–15.

9. Информация об авторах предоставляется на двух языках – английский и русский/белорусский:

- фамилия, имя, отчество авторов (без сокращений);
- ученая степень, ученое звание (полное/сокращенное);
- должность, наименование учреждений, где работают авторы (полное/сокращенное) с указанием города и страны;
- контактные данные каждого автора (телефон, e-mail).

*К печати принимаются статьи, отвечающие профилю журнала,
не публиковавшиеся ранее в других отраслевых изданиях.*

*Материалы, оформленные с нарушением требований или не прошедшие рецензирование
(отклонены рецензентом) не публикуются.*