

*Әуе қорғанысы күштері Әскери
институтының
ХАБАРШЫСЫ
ғылыми журналы*

*scientific journal
BULLETIN
Military institute
of the Air defense forces*

*научный журнал
ВЕСТНИК
Военного института Сил воздушной
обороны*

**№ 2(26), 2026 ж. маусым
тоқсанына бір рет шығады**



Меншік иесі: «Әуе қорғанысы күштерінің Әскери институты»
Республикалық мемлекеттік мекемесі

Қазақстан Республикасының Ақпарат және қоғамдық даму министрлігімен мерзімді
баспасөз басылымын есепке қою туралы 2020 жылғы 19 маусымда
№KZ76VPY00024366 куәлігі берілген.

БАС РЕДАКТОР
Тимур Төлегенұлы Еспағанбетов
БАС РЕДАКТОРДЫҢ ОРЫНБАСАРЫ
т.ғ.к., Ербол Тоқтамысұлы Ескибаев

РЕДАКЦИЯЛЫҚ АЛҚА МҮШЕЛЕРІ
ф-м.ғ.к., профессор Д.М.Сергеев (Т.Бигелдинов атындағы Әуе қорғанысы
күштерінің Әскери институты, Ақтөбе қ.);
т.ғ.к., М.К.Казамбаев (Тұңғыш Президенті – Елбасы атындағы Ұлттық қорғаныс
университеті, Астана қ.);
PhD, Н.Н.Жантурина (Қ.Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті);
т.ғ.д., профессор Н.К.Юрков (Пенза мемлекеттік университеті, Ресей Федерациясы,
Пенза қ.);
PhD, О.И.Лыгина (С.Бәйішев атындағы Ақтөбе университеті, Ақтөбе қ.).

*Жарияланған мақалалар редакцияның көзқарасын білдірмеуі мүмкін. Мақала
мазмұнына автордың өзі жауапты. Журнал мақалалары басқа басылымдарда көшіріліп
басылса, «ӘҚК ӘИ хабаршысы» ғылыми журналына сілтеме жасалуы қажет.*

МАЗМҰНЫ

ӘСКЕРИ ІСТЕРДІҢ ЖАЛПЫ МӘСЕЛЕЛЕРІ

К.М.Казиев, А.Б.Есенжолова Стратегии технического обслуживания воздушных судов и их влияние на качество обслуживания	3
Т.Т.Карамергенов Построение структурной модели автоматизированной системы управления полетом воздушного судна	13
А.А.Yergazina The concept, essence, and classification of military aviation terminology	20

ӘСКЕРИ-ҚОЛДАНБАЛЫ ҒЫЛЫМДАР

Е.К.Садвокасов Анализ современных средств радиолокации в обеспечении полётов	29
В.В.Лохматов Изготовление линзового отражателя с помощью 3D-печати	41
И.С.Бакниязов Анализ неисправностей гидравлического насоса НШ-39 и методов их диагностики в условиях эксплуатации	51

ҚАРУ-ЖАРАҚ ПЕН ӘСКЕРИ ТЕХНИКА

М.К.Танатов, И.И.Ермейчук Перспективалы ұшқышсыз ұшу аппараттары	60
Т.И.Уразбагамбетов, М.Б.Казанцев, Б.З.Татенов Анализ отказов и неисправностей воздушных судов военно-воздушных сил республики казахстан	71

ЖАҢА ТЕХНИКАЛЫҚ ҚҰРАЛДАРДЫ ЖАСАУДЫҢ ФИЗИКА-МАТЕМАТИКАЛЫҚ ӘДІСТЕРІ МЕН МОДЕЛЬДЕРІ

И.С.Бакниязов Методика построения системы диагностики гидравлического насоса НШ-39 на основе анализа давления, расхода и вибрационных параметров	78
---	----

ӘСКЕРИ ІСТЕРДІҢ ЖАЛПЫ МӘСЕЛЕЛЕРІ

УДК 78.01.37

Казиев К.М., Есенжолова А.Б.

*Военный институт Сил Воздушной обороны имени Т.Ж. Бигелдинова
Республика Казахстан, город Актөбе*

**СТРАТЕГИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ
СУДОВ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА КАЧЕСТВО ОБСЛУЖИВАНИЯ**

Андатпа: Бұл мәтін қазіргі заманғы әуе кемелеріне техникалық қызмет көрсету стратегияларын және олардың сенімділікке, ұшу қауіпсіздігіне және пайдалану тиімділігіне әсерін қарастырады. Техникалық қызмет көрсету стратегияларының анықтамалары берілген. Онда бір ұшақтың ұшып шығуын қамтамасыз ету әртүрлі қызметтерді кешенді үйлестіруді қажет ететінін, ал пайдалану тиімділігі техникалық жағдайды басқару стратегиясын дұрыс таңдауға тікелей байланысты екенін атап көрсетеді. Бұл бапта әуе кемелеріне техникалық қызмет көрсетудің бірнеше стратегиясының артықшылықтары мен кемшіліктері талданады және салыстырылады. ТҚК стратегияларының ақпарат алу көзі мен уақыты бойынша жіктелуі талданады: жұмыс істеуі бойынша (ТОНАР), сенімділікті бақылайтын жағдай бойынша (ТОСКН) және параметрлерді бақылайтын жағдай бойынша (ТОСКП). Әрбір стратегияның ерекшеліктері, олардың ұйымдық қағидаттары, ақпараттық қамтамасыз ету мен ресурстарды бөлуге қойылатын талаптар егжей-тегжейлі ашылады. Жұмыс істеу стратегиясы қызмет көрсетудің регламенттелген аралықтарына және бұйымдардың ресурсын шектеуге негізделген. Сенімділікті бақылайтын стратегия бір типті объектілердің істен шығу көрсеткіштерін талдауға және қауіпсіз істен шығуға дейін пайдалануға бағдарланған. Параметрлер бойынша стратегия қазба алдындағы жағдайларды анықтау мақсатында ағымдағы техникалық көрсеткіштерді диагностикалау мен мониторинктеуді болжайды. Жай-күйі бойынша қызмет көрсету стратегияларының артықшылықтарына, оның ішінде тоқтап тұруды қысқартуға, қосалқы бөлшектер шығынын азайтуға және пайдалану шығындарын азайтуға ерекше назар аударылады. Техникалық диагностика құралдарын және қызмет көрсету сапасын бақылау жүйелерін дамытудың маңыздылығы атап өтіледі. Әуе кемесінің жүйелері мен агрегаттарының жай-күйі параметрлерін бақылаудың борттық техникалық құралдарының, сондай-ақ тұтастай алғанда әуе кемесінің параметрлері мониторингінің жерүсті диагностикалық, бақылау, беруші құралдарының сапасын күшейту қажеттілігі қаралады. Қорытындыда сандық технологиялар мен болжамды талдауға негізделген алдын ала қызмет көрсетуді қолдану перспективалығы негізделеді. Алдын ала қызмет көрсетудің қажеттілігіне қарай қызмет көрсетумен және профилактикалық қызмет көрсетумен салыстырмалы талдауы ұсынылған. Ұтқыр технологиялар мен қашықтан мониторинг жүйесін енгізу әуе кемелерін пайдаланудың сенімділігін едәуір арттыруға, шығындарды азайтуға және өндірістік тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: Әуе кемесі, техникалық жай-күйі, техникалық қызмет көрсету, өндірістік-техникалық пайдалану, қызмет көрсету стратегиясы, жұмыс істеуі, істен шығуы, ресурсы, жүйесі, объектісі, агрегаты, сенімділігі, бақылау құралдары, регламенттік жұмыстар, мониторинг.

Аннотация: В представленном тексте рассматриваются современные стратегии технического обслуживания (ТО) воздушных судов и их влияние на надежность, безопасность полетов и экономическую эффективность эксплуатации. Даются определения стратегии технического обслуживания. Подчеркивается, что обеспечение вылета одного воздушного судна требует комплексной координации различных служб, а эффективность эксплуатации напрямую зависит от правильного выбора стратегии управления техническим

состоянием. В данной статье анализируются и сравниваются преимущества и недостатки нескольких стратегий технического обслуживания воздушных судов. Анализируется классификация стратегий ТО по источнику и времени получения информации: по наработке (ТОНАР), по состоянию с контролем надежности (ТОСКН) и по состоянию с контролем параметров (ТОСКП). Подробно раскрываются особенности каждой стратегии, их организационные принципы, требования к информационному обеспечению и распределению ресурсов. Стратегия по наработке основана на регламентированных интервалах обслуживания и ограничении ресурса изделий. Стратегия с контролем надежности ориентирована на анализ показателей отказов однотипных объектов и эксплуатацию до безопасного отказа. Стратегия по параметрам предполагает диагностику и мониторинг текущих технических показателей с целью выявления предотказных состояний. Особое внимание уделяется преимуществам стратегий обслуживания по состоянию, включая сокращение простоев, снижение расхода запасных частей и уменьшение эксплуатационных затрат. Отмечается важность развития средств технической диагностики и систем контроля качества обслуживания. Рассматривается необходимость усиления качества бортовых технических средств контроля параметров состояния систем и агрегатов воздушного судна, а также наземных диагностических, контрольных, передающих средств мониторинга параметров воздушного судна в целом. В заключении обосновывается перспективность применения упреждающего обслуживания, основанного на цифровых технологиях и предиктивной аналитике. Представлен сравнительный анализ упреждающего обслуживания с обслуживанием по необходимости и профилактическим обслуживанием. Подчеркивается, что внедрение мобильных технологий и систем удаленного мониторинга позволяет значительно повысить надежность, снизить затраты и увеличить производственную эффективность эксплуатации воздушных судов

Ключевые слова: Воздушное судно, техническое состояние, техническое обслуживание, производственно – техническая эксплуатация, стратегия обслуживания, наработка, отказ, ресурс, система, объект, агрегат, надежность, средства контроля, регламентные работы, мониторинг.

Annotation: The presented text discusses modern aircraft maintenance strategies and their impact on reliability, flight safety and economic efficiency of operation. The maintenance strategy is defined. It is emphasized that ensuring the departure of one aircraft requires comprehensive coordination of various services, and the efficiency of operation directly depends on the correct choice of the technical condition management strategy. This article analyzes and compares the advantages and disadvantages of several aircraft maintenance strategies. The classification of maintenance strategies by the source and time of obtaining information is analyzed: by operating time (TONAR), by the state with reliability control (TSCS) and by the state with parameter control (TSCS). The specifics of each strategy, their organizational principles, requirements for information support and resource allocation are described in detail. The operating time strategy is based on regulated maintenance intervals and product resource limitation. The reliability control strategy is focused on analyzing failure rates of similar facilities and operating until a safe failure. The parameter strategy involves the diagnosis and monitoring of current technical indicators in order to identify pre-failure conditions. Emphasis is placed on the benefits of on-condition service strategies, including reduced downtime, reduced spare parts consumption, and reduced operating costs. The importance of developing technical diagnostics tools and service quality control systems is noted. It is considered the need to strengthen the quality of on-board technical means for monitoring the parameters of the state of systems and assemblies of the aircraft, as well as ground diagnostic, control, transmitting means for monitoring the parameters of the aircraft as a whole. The conclusion justifies the promise of proactive maintenance based on digital technologies and predictive analytics. Provides a comparison of Proactive Maintenance versus On-Demand and Preventive Maintenance. It is emphasized that the introduction of mobile technologies and remote

monitoring systems can significantly improve reliability, reduce costs and increase the operational efficiency of aircraft

Key words: Aircraft, technical condition, maintenance, production and technical operation, maintenance strategy, operating time, failure, resource, system, object, unit, reliability, control means, routine maintenance, monitoring.

Введение

Для обеспечения вылета одного летательного аппарата необходима координация усилий инженерно-авиационной, горюче-смазочных, аэродромной, светосигнального и радиотехнического обеспечения, диспетчерской службы воздушного движения, автотранспорта, метеонаблюдения и других подразделений. Эффективность зависит от своевременной подготовки, точности действий и минимизации задержек

Стратегия технического обслуживания (ТО) — набор регламентов, обеспечивающих управление техническим состоянием ВС через планирование и выполнение мероприятий ТО. Практически существуют несколько стратегий ТО. Основной признак выбора стратегии — это обеспечение заданного уровня готовности ВС, минимизации простоев, оптимизация затрат на обслуживание.

Получение информации делится: по времени - на априорную и апостериорную; по источникам – на обобщенную (по всему парку воздушных судов (ВС)) и индивидуальную (по каждому ВС).

Этим различиям соответствуют методы анализа и прогнозирования: обобщенные данные применяются для планирования по всему парку ВС, индивидуальные — для детального мониторинга состояния и планирования технического обслуживания и ремонта.

Исходя из возможных сочетаний времени и источников получения информации существуют четыре вида стратегий ТО (табл. 1).

Таблица 1.

Виды стратегий ТО ВС

По источнику	По времени	
	Априорная	Апостериорная
Обобщенная	По наработке для всех однотипных объектов, находящихся в эксплуатации (ТОНАРо)	По состоянию с контролем надежности всех объектов, находящихся в эксплуатации (ТОСКН)
Индивидуальная	По наработке индивидуально для каждого объекта (ТОНАРи)	По состоянию с контролем параметров ТС каждого объекта (ТОСКП)

Стратегии ТО по состоянию (ТОСКН, ТОСКП) отличаются от стратегий по наработке (ТОНАР) по структуре производственно – технической эксплуатации (ПТЭ) и распределению ресурсов. ТО по состоянию предполагают развитие материально-технического обеспечения базы (МТОБ) эксплуатационных служб: регламенты, запасы, графики и готовность ВС, с акцентом на мониторинг состояния и прогноз остаточного ресурса, совершенствование контролепригодности. Они ориентированы на поддержание заданного ТС ВС за счет мониторинга состояния, диагностики и прогноза ресурсного износа.

Так, при реализации стратегий по наработке акцент делается на увеличение ресурса изделий, прогнозирование остаточного ресурса и своевременное обновление ремонтной базы за счет планово-предупредительного обслуживания, расширения сервисной инфраструктуры и внедрения новых технологий. Основной акцент делается на мероприятия

по определению технического состояния ВС, другие виды работ делаются по необходимости

Предупредительный характер стратегий, основанных на состоянии, заключается в постоянном мониторинге изменений в техническом состоянии (надежности) объектов, находящихся в эксплуатации, а также в оперативной реализации мероприятий, направленных на выявление и устранение отказов и неисправностей. Основное преимущество этих стратегий заключается в высокой эффективности технического обслуживания и эксплуатации (ПТЭ), что обусловлено минимальными простоями воздушных судов (ВС) на техническом обслуживании, снижением расхода запасных частей и повышением уровня надежности изделий. Практика демонстрирует, что эксплуатационные расходы, связанные с техническим обслуживанием, при переходе на стратегии, основанные на состоянии, сокращаются более чем в два раза.

Метод исследования

Рассмотрим и проанализируем преимущества и недостатки всех этих стратегии в отдельности.

Стратегия ТОНАР (метод технического обслуживания по ресурсу - ТЭР) представляет собой подход к управлению технической эксплуатацией (ПТЭ), при котором объем и периодичность работ по техническому обслуживанию (режим ТО) устанавливаются на основе наработки воздушных судов (ВС) с момента начала эксплуатации или после последнего капитального ремонта. Одним из важнейших требований к системе технической эксплуатации при использовании ТОНАР является обеспечение заданного уровня надежности (безотказности) объектов при минимизации эксплуатационных расходов.

При установлении режимов технического обслуживания (ТО) объектов используются данные о потребностях в мероприятиях, направленных на поддержание и восстановление их работоспособности. Эти данные получают в ходе летных испытаний и серийной эксплуатации ограниченного парка воздушных судов (ВС). Мероприятия по поддержанию и восстановлению работоспособности объектов группируются по различным видам и формам ТО, которые строго увязываются с наработкой (Ф1 – 300 часов, Ф2 – 900 часов, Ф3 – 1800 часов и т.д.). Режим ТО практически не изменяется на протяжении всего жизненного цикла ВС, независимо от условий его эксплуатации.

В группу объектов, которые эксплуатируются по стратегии ТОНАР, входят наиболее ответственные изделия ВС (насосы, генераторы, силовые элементы конструкций и т.д.), подверженные постепенным отказам, которые сложно контролировать. Поскольку отказы объектов ТОНАР не поддаются прогнозированию, проверки этих объектов обычно не связываются с процессами изменений их технического состояния (ТС) и в основном направлены на выявление скрытых производственных дефектов и различных эксплуатационных повреждений. Необходимый уровень надежности (безотказности) объектов ТОНАР обеспечивается за счет ограничения сроков их эксплуатации и ресурсов.

Стратегия ТОСКН (метод технической эксплуатации до отказа — ТЭО) — это подход к управлению производственно-технической эксплуатацией, при котором объем и периодичность технического обслуживания определяются исходя из показателей надежности (безотказности) всех однотипных изделий, находящихся в эксплуатации.

Ключевым требованием при реализации ТОСКН является обеспечение установленного уровня надежности объекта при одновременной минимизации эксплуатационных затрат.

Среди комплектующих агрегатов, входящих в состав воздушного судна, выделяется значительная группа изделий (до 70 % от их общего числа), отказы которые проявляются внезапно и не связаны с наработкой и они оказывают незначительное влияние на безопасность полётов. Эти изделия отличаются высокой контролепригодностью и

эксплуатационной технологичностью. К ним относится большинство агрегатов функциональных систем — гидравлической, высотной, радиотехнической, электрической и других. Как правило, причиной их отказов является случайное попадание отдельных, наиболее ослабленных или повреждённых экземпляров в экстремальные условия эксплуатации (например, при перегрузках).

Ввиду внезапного характера отказов проверки технического состояния объектов при стратегии ТОСКН оказываются эффективными лишь в тех случаях, когда полной утрате работоспособности предшествует возникновение одной или нескольких неисправностей (частичных отказов). Обнаруженные неисправности устраняются путём замены или ремонта отказавшего элемента, после чего объект возвращается в эксплуатацию.

Практика реализации данной стратегии показала, что высокая эффективность производственно-технической эксплуатации может быть достигнута только при соблюдении следующих условий:

- рациональный выбор объектов применения;
- минимально необходимое информационное обеспечение;
- своевременное проведение мероприятий, обеспечивающих повышение надёжности изделий.

Основными особенностям производственно-технической эксплуатации при использовании этой стратегии являются:

- отсутствие жёстких ограничений по межремонтным ресурсам воздушных судов;
- эксплуатация изделий до проявления безопасного отказа;
- непрерывный мониторинг степени надёжности воздушных судов;
- систематическая реализация мероприятий по повышению их надёжности.

Основным регулятором при стратегии ТОСКН являются такие показатели, как параметр потока отказов $\omega(t)$ или количество отказов на 1000 часов наработки ($K1000$).

Нормальным условием эксплуатации является $\omega(t) \leq [\omega(t)]$

При превышении фактического значения от допускаемого ($\omega(t) > [\omega(t)]$) формируются мероприятия, способствующие повышению его надёжности: ограничиваются нагрузки, устанавливаются сроки дополнительных проверок, проводится калибровка параметров, а также другие корректирующие мероприятия.

Для оперативного контроля и управления надёжностью объектов в процессе эксплуатации осуществляется постоянный мониторинг её уровня, результаты которого, как правило, представляются в графической форме (см. рис. 1).

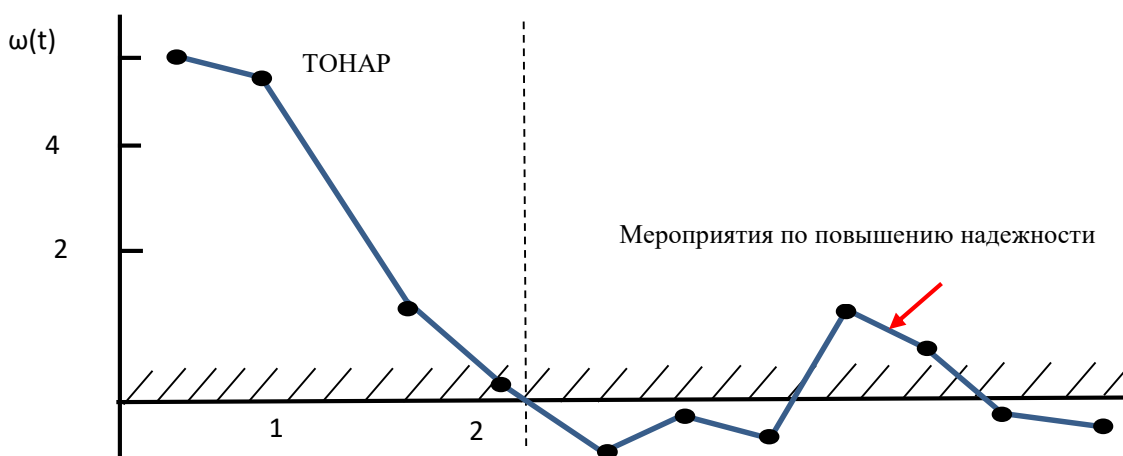


Рисунок 1. График надёжности объекта

Поддержание заданного уровня безотказности объектов при стратегии ТОСКН основано на правильном установлении периодичности контроля их технического состояния.

По своему содержанию проверки, выполняемые в рамках ТОСКН, имеют незначительные отличия от проверок, проводимых при ТОНАР. Они связаны с выявлением эксплуатационных повреждений, отказавших элементов, а также на проверку и калибровку параметров изделий.

Основной особенностью проверок при ТОСКН является то, что сроки их проведения зависят от наработки объекта, то есть имеют установленную периодичность.

Проверки технических средств (ТС) воздушных судов (ВС) проводятся с использованием:

Встроенных (бортовых) средств контроля: интегрированных в систему ВС для мониторинга его состояния непосредственно в полете.

Внешних (наземных) средств контроля: применяются, когда точное определение ТС бортовыми средствами невозможно или недостаточно.

Средств контроля при техническом обслуживании (ТО): проводятся в процессе планового обслуживания ВС.

Периодичность проверок определяется исходя из:

Требуемого уровня безотказности: устанавливается на основе показателей заданного уровня безотказности (например, $R_{зад}$, $\omega(t)$ или $K1000$).

Экономических факторов: учитываются допустимые материальные расходы, связанные с эксплуатацией объекта. Поскольку отказы объектов технического обслуживания, контроля и навигации (ТОСКН) могут иметь как влияние на безопасность полетов, так и стоимостное выражение, периодичность проверок может быть оптимизирована с учетом экономических критериев.

Предупреждение отказов объектов ТОСКН при введении проверок основано на том, что полной потере работоспособности (отказу) объекта, как правило, предшествует возникновение одной или нескольких неисправностей (частичных отказов).

Пример: Отказ высотной системы самолета

Рассмотрим в качестве примера отказ высотной системы самолета, состоящей из нескольких выпускных клапанов. Каждый клапан обеспечивает нормальную работу системы. Полный отказ системы может произойти только при одновременном отказе всех клапанов в течение одного полета. Однако вероятность такого события крайне мала благодаря высокой безотказности отдельных выпускных клапанов.

Проведение периодических проверок и технического обслуживания (ТО) ВС, включая проверку работоспособности выпускных клапанов, дополнительно снижает вероятность отказа системы. Это обусловлено тем, что вышедшие из строя клапаны в ходе ТО заменяются на новые или ремонтируются, восстанавливая их работоспособность.

Стратегия ТОСКП (метод технической эксплуатации по параметрам — ТЭП) основан на принципе управления процессами технической эксплуатации, который учитывает объём и периодичность работ по техническому обслуживанию на основе анализа текущих значений контролируемых параметров воздушного судна (ВС) относительно установленных допусковых границ.

Ключевым требованием к данному режиму технического обслуживания является обеспечение заданного уровня надёжности (безотказности) объектов в межконтрольный период при условии минимизации эксплуатационных затрат.

К объектам ТОСКП относится широкий класс изделий ВС, для которых основным являются постепенные отказы, существенно влияющие на безопасность полётов, а также такие, динамика деградации которых поддаётся контролю существующими средствами технической диагностики. К указанной категории относятся, в частности, силовые

элементы конструкций, подверженные усталостным разрушениям, источники давления (насосы), фильтры, узлы трения и др.

Вероятность отказа объектов ТОСКП в значительной степени определяется их наработкой с начала эксплуатации, режимами функционирования, качеством технического обслуживания, характеристиками применяемых горюче-смазочных материалов и рядом иных эксплуатационных факторов.

Период развития отказов объектов ТОСКП имеет временную протяжённость, сопоставимую с отдельными этапами эксплуатации воздушного судна (формами технического обслуживания, капитальными ремонтами и др.). В связи с этим при выполнении регламентных проверок появляется возможность своевременного обнаружения и замены (восстановления) объектов, находящихся в предотказном состоянии, что позволяет предотвратить возникновение отказов.

В связи с этим, объекты ТОСКП эксплуатируются до момента достижения предотказного состояния, при этом ограничения на межремонтные ресурсы аннулируются. Проверки выполняются в строгой периодичности, учитывающие требования к безотказности объекта, конструктивной живучести, а также надёжности и достоверности применяемых средств контроля.

По результатам проверок формируются управляющие воздействия на процесс технической эксплуатации объекта, то есть эти воздействия зависят от того насколько текущих значений контролируемых параметров приблизились к их предельным (допускаемым) значениям. Для выявления предотказных состояний устанавливаются упреждающие допуски на параметры (УДП), величины которых определяются периодичностью проверок, интенсивностью изменения технического состояния, а также критериями к безотказности объекта.

В отличие от стратегии ТОНАР стратегия ТОСКП обладает следующими преимуществами:

- максимальное использование резервов долговечности изделий за счёт использования индивидуальных ресурсов в отличие от среднестатистических;
- сокращением времени на техническое обслуживание;
- своевременное выявление и устранение неисправностей позволяет поддерживать высокий уровень безотказности изделий.

Вместе с тем успешная реализация стратегии ТОСКП в значительной степени определяется наличием эффективных методов и средств технической диагностики, уровнем контролепригодности и технологичности воздушных судов, а также рядом других факторов.

Стратегия ТОСКП, как и другие стратегии технического обслуживания, относится к планово-предупредительным. Плановость стратегии — это проверка объектов с определенной периодичностью, а её профилактический характер — в своевременной замене (восстановлении) объектов, находящихся в предотказном состоянии.

На протяжении длительного времени техническое обслуживание воздушных судов, его технология, процессы непосредственного управления ТО и контроля выполненных операций, определяющие качество обслуживания, не имели достаточной теоретической базы. Вместе с тем системное исследование и формализация основных этапов ТО ВС в рамках человеко-ориентированной системы обслуживания являются необходимым условием создания высокоэффективной системы диагностического управления качеством работ по ТО.

Такая система должна обеспечивать непрерывный мониторинг качества технического обслуживания по оперативным показателям посредством операционного контроля в процессе выполнения ТО, что способствует повышению надёжности воздушных судов.

Следует отметить недостаточную проработанность вопросов выбора стратегии диагностической проверки отдельных операций и построения структуры системы обеспечения качества с учётом условий её применения, а также свойств и характеристик выполняемых операций. Для создания глубоко структурированной и эффективно функционирующей системы диагностического управления качеством ТО требуется решение комплекса научно-технических задач.

В основе построения такой системы лежит моделирование технологических операций и процессов, а также разработка на этой базе методического, информационного и инструментального обеспечения. Без решения указанных задач невозможно удовлетворение повышенных требований к качеству и надёжности в условиях не стационарности процесса технического обслуживания, обусловленной частыми доработками номенклатуры изделий воздушных судов.

Однако выполнение заранее установленного объёма профилактических работ в установленные сроки, регламентируемые действующими стратегиями технического обслуживания с контролем надёжности, не обеспечивает снижения вероятности возникновения отказов.

Принятие решений при данном методе технического обслуживания основывается на следующих положениях:

- прогнозировании показателей надёжности или технического состояния объекта;
- использовании типовых программ принятия решений, сформированных на основе технико-экономической информации об эксплуатации совокупности однотипных объектов;
- учёте данных о затратах на техническое обслуживание конкретного объекта.

Результаты и обсуждения

В виду постоянного развития информатизационных технологий появилась возможность использования мобильной технологии для технического обслуживания воздушных судов. Мобильная технология изменила способы коммуникации между людьми, доставки товаров, мониторинга оборудования и даже основные принципы управления производственными процессами.

Использование мобильных технологии для мониторинга ресурсов и инструментов диагностики на дистанции, дают возможность сэкономить эксплуатационные расходы.

Стоимость упреждающей эксплуатации, составляет ориентировочно одну десятую от затрат на корректирующую эксплуатацию и около одной пятой от затрат на профилактическую эксплуатацию.

Бортовые устройства регистрации информации, установленные на воздушном судне, выполняют удаленный мониторинг технического состояния и дают возможность использовать механизм «упреждающего обслуживания».

Используя возможности беспроводной связи, специалист получает доступ к целому ряду необходимой информации:

- общие сведения: бортовой номер, заводской номер, дата выпуска и т.д.,
- ремонтные данные;
- удостоверения и свидетельства;
- ресурсы и наработки;
- выполнение регламентных работ;
- выполнение бюллетеней и указаний;
- история комплектации борта двигателями и ВСУ.

Увеличение надежности безопасности полётов обеспечивается за счёт возможности доступа в реальном времени к распределённым информационным ресурсам и встроенным датчикам, осуществляющим мониторинг параметров основных систем воздушного судна.

Увеличение эффективности использования трудовых ресурсов достигается снижением необходимости в непосредственном осмотре удалённого оборудования и датчиков на местах эксплуатации.

Из сказанного следует, что применение упреждающей эксплуатации обеспечивает максимальную эффективность времени бесперебойной работы оборудования и систем воздушного судна в целом.

Заключение

В настоящее время перспективным направлением является использование технологий упреждающего анализа (Predictive Analytics) технического состояния систем воздушного судна, направленное на повышение надежности, экономичности, рентабельности эксплуатации. Технология упреждающего анализа, базируется на сборе и обработке данных и дает возможность анализировать и делать прогноз дальнейшего развития событий, используется в программном пакете Macsea Dexter, который автоматизирует мониторинг и диагностику состояния систем ВС.

Система осуществляет постоянный анализ и обработку входящих данных, своевременно извещает оператора о возникших и потенциальных проблемах, выполняет анализ функционирования компонентов оборудования в режиме реального времени и формирует прогноз его технического состояния.

Благодаря высокой экономической эффективности, технологии и методы упреждающего обслуживания стали новым этапом развития технической поддержки. За последние три десятилетия подходы к техническому обслуживанию эволюционировали от обслуживания по необходимости к профилактическому обслуживанию, а затем — к упреждающему обслуживанию.

Методы упреждающего обслуживания обеспечивают более значительный экономический эффект по сравнению с подходами обслуживания по необходимости и профилактическими методами. Исследования показывают, что затраты на профилактическое обслуживание могут быть в 5 раз выше, а на обслуживание по фактической необходимости — в 15 раз выше по сравнению с упреждающим подходом. Существенная экономия достигается также за счёт сокращения времени на техническое обслуживание.

Дополнительный экономический эффект формируется за счёт отказа от избыточного профилактического обслуживания и связанных с ним затрат на материалы и трудовые ресурсы, а также благодаря сокращению объёмов резервного оборудования и расходов на его содержание.

Средние показатели производственной эффективности при внедрении упреждающего подхода составляют:

- рентабельность инвестиций — около 10 %;
- сокращение затрат на обслуживание — на 25–30 %;
- снижение количества аварий — на 70–75 %;
- рост производительности — на 20–25 %.

Технологии упреждающего подхода позволяют сократить избыточные затраты на техническую поддержку, уменьшить потребность в трудовых ресурсах, повышает уровень безопасности труда персонала.

Список использованных источников

1. Никифоров, А.Д. Управление качеством/ А.Д. Никифоров. - М.: Дрофа, 2004.
2. Менеджмент качества как он есть / М.Г. Круглов, Г.М. Шишков. - М.: Эксмо, 2006. - 544с. - (Качественный менеджмент).
3. Методические рекомендации по разработке и внедрению системы качества авиа-

предприятиями Гражданской авиации Российской Федерации/ А.Г. Костылев, В.С. Коротков, А.В. Бахтин [и др.] - СПб.: Академия ГА, 1999. - 55 с.

4. Смирнов, Н.Н. Техническая эксплуатация летательных аппаратов: учебник для вузов/ Н.Н. Смирнов. - М.: Транспорт, 1990. -423 с.

5. <https://www.bilim/expert/post/> техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей

УДК 629.735.05

Т.Т.Карамергенов

Военный институт Сил Воздушной обороны имени Т.Ж. Бигелдинова

Республика Казахстан, город Актобе

E-mail:timur12512@yandex.kz

ПОСТРОЕНИЕ СТРУКТУРНОЙ МОДЕЛИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЁТОМ ВОЗДУШНОГО СУДНА

Андатпа: Мақалада қауіпсіздікті, тиімділікті және ұшуды автоматтандыру деңгейін анықтайтын заманауи авиониканың негізгі компоненттерінің бірі — әуе кемесінің ұшуды басқарудың автоматтандырылған жүйесінің (АСУП) құрылымдық моделін құру әдістемесі қарастырылады. Автор ұшу міндеттерінің күрделенуіне, ұшуға жарамдылық талаптарының қатандатылуына және жасанды интеллект технологияларының белсенді енгізілуіне байланысты АСУП-ны ресімделген сипаттау қажеттілігін негіздейді. Жұмыста қазіргі заманғы азаматтық (Airbus A320/A350, Boeing 787) және әскери әуе кемелеріне тән ұшуды басқару жүйелерінің функционалдық архитектурасына егжей-тегжейлі талдау жүргізілді. Негізгі компоненттер: автоматты басқару жүйесі (автопилот, тарту автоматы), ұшуды және навигацияны басқару жүйесі (FMS), борттық есептеу кешені, сыни режимдердің алдын алу жүйелері (GPWS/TAWS) және экипажға ақпарат ұсынудың ішкі жүйесі. DO-178C және ARP4754A стандарттарының талаптарын ескере отырып, осы компоненттер арасындағы ақпараттық және басқарушылық қатынастар анықталды. Idef0 функционалды модельдеудің жүйелік тәсілі мен әдіснамасына сүйене отырып, ішкі жүйелердің иерархиясын (стратегиялық, тактикалық және атқарушы деңгейлер), ақпараттық ағындарды (ARINC 429, ARINC 664, MIL-STD-1553 шиналары) және критикалық контурлардың уақыт сипаттамалары бар басқару алгоритмдерін көрсететін АСУП көп деңгейлі құрылымдық моделі жасалды. Модельді тексеру және сертификаттау құралдарымен жұптастыруға ерекше назар аударылады. Жасанды интеллект технологияларын басқару тізбегіне интеграциялау тұжырымдамасы ұсынылды. Нейрондық желілер мен бұлыңғыр логикаға негізделген интеллектуалды модуль адаптивті маршрутты жоспарлау, істен шығуды жіктеу, техникалық жағдайды болжау және экипаждың шешім қабылдауын қолдау функцияларын орындайды. Бұл ретте, EASA ұсынымдарына сүйене отырып, жасанды интеллект сыни контурларға енгізілмейді, бірақ "кеңесші" (Decision Assistance) деңгейінде жұмыс істейді. Өзірленген құрылымдық модель 97,3% функционалдық талаптарға сәйкестігін растайтын MATLAB/Simulink ортасында статикалық талдау және имитациялық модельдеу әдістерімен тексеруден өтті. Модель перспективалы ASUP дизайнына, сондай-ақ жасанды интеллект элементтері бар гибриді жүйелерді қоса алғанда, ұшуды басқару жүйелерін тексеру және сертификаттау міндеттеріне негіз бола алады.

Түйін сөздер: Басқарудың автоматтандырылған жүйесінің, құрылымдық модель, автопилот, борттық есептеу кешені, IDEF0, система управления полётом, жасанды интеллект, авионика.

Annotation: The article discusses the methodology of building a structural model of an automated flight control system (ASM) of an aircraft, one of the key components of modern avionics, which determines the safety, efficiency and level of flight automation. The author substantiates the need for a formalized description of the automated control system due to the increasing complexity of flight tasks, stricter airworthiness requirements and the active introduction of artificial intelligence technologies. The paper provides a detailed analysis of the functional architecture of flight control systems typical for modern civilian (Airbus A320/A350, Boeing 787) and military aircraft. The basic components are highlighted: an automatic control system (autopilot, automatic thrust control), a flight control and navigation system (FMS), an on-

board computer system, critical mode warning systems (GPWS/TAWS) and a subsystem for presenting information to the crew. The information and control relationships between these components have been determined, taking into account the requirements of the DO-178C and ARP4754A standards. Based on the system approach and the IDEF0 functional modeling methodology, a multilevel structural control system model has been developed that reflects the hierarchy of subsystems (strategic, tactical and executive levels), information flows (ARINC 429, ARINC 664, MIL-STD-1553 buses) and control algorithms with time characteristics of critical circuits. Special attention is paid to the interface of the model with verification and certification tools. The concept of integrating artificial intelligence technologies into the control loop is proposed. The intelligent module based on neural networks and fuzzy logic performs the functions of adaptive route planning, failure classification, prediction of technical condition and decision support by the crew. At the same time, following EASA recommendations, artificial intelligence is not included in critical circuits, but works at the level of an "adviser" (Decision Assistance). The developed structural model has been verified by static analysis and simulation methods in the MATLAB/Simulink environment, confirming compliance with functional requirements by 97.3%. The model can serve as a basis for the design of advanced automated control systems, as well as for the tasks of verification and certification of flight control systems, including hybrid systems with elements of artificial intelligence.

Key words: Automated flight control system, structural model, autopilot, onboard computing complex, IDEF0, flight management system, artificial intelligence, avionics.

Аннотация: В статье рассматривается методология построения структурной модели автоматизированной системы управления полётом (АСУП) воздушного судна — одного из ключевых компонентов современной авионики, определяющего безопасность, эффективность и уровень автоматизации полётов. Автор обосновывает необходимость формализованного описания АСУП в связи с усложнением полётных задач, ужесточением требований лётной годности и активным внедрением технологий искусственного интеллекта. В работе проведён детальный анализ функциональной архитектуры систем управления полётом, характерных для современных гражданских (Airbus A320/A350, Boeing 787) и военных воздушных судов. Выделены базовые компоненты: система автоматического управления (автопилот, автомат тяги), система управления полётом и навигации (FMS), бортовой вычислительный комплекс, системы предупреждения критических режимов (GPWS/TAWS) и подсистема представления информации экипажу. Определены информационные и управляющие взаимосвязи между этими компонентами с учётом требований стандартов DO-178C и ARP4754A. На основе системного подхода и методологии функционального моделирования IDEF0 разработана многоуровневая структурная модель АСУП, отражающая иерархию подсистем (стратегический, тактический и исполнительный уровни), информационные потоки (шины ARINC 429, ARINC 664, MIL-STD-1553) и алгоритмы управления с временными характеристиками критических контуров. Особое внимание уделено сопряжению модели с инструментальными средствами верификации и сертификации. Предложена концепция интеграции технологий искусственного интеллекта в контур управления. Интеллектуальный модуль на основе нейросетей и нечёткой логики выполняет функции адаптивного планирования маршрута, классификации отказов, прогнозирования технического состояния и поддержки принятия решений экипажем. При этом, следуя рекомендациям EASA, искусственный интеллект не включается в критические контуры, а работает на уровне «советника» (Decision Assistance). Разработанная структурная модель прошла верификацию методами статического анализа и имитационного моделирования в среде MATLAB/Simulink, подтвердившую соответствие функциональным требованиям на 97,3%. Модель может служить основой для проектирования перспективных АСУП, а также

для задач верификации и сертификации систем управления полётом, включая гибридные системы с элементами искусственного интеллекта.

Ключевые слова: Автоматизированная система управления полётом, структурная модель, автопилот, бортовой вычислительный комплекс, IDEF0, система управления полётом, искусственный интеллект, авионика.

Введение

Если вы когда-нибудь смотрели из иллюминатора на крыло пассажирского самолёта в турбулентности и видели, как элероны быстро и точно работают, компенсируя качку, то вы наблюдали результат работы автоматизированной системы управления полётом. Но то, что происходит за панелью приборов, гораздо сложнее и интереснее. Современное воздушное судно - это не просто машина с двигателями и крыльями. Это настоящая киберфизическая система, где механика, электроника и программное обеспечение переплетены в единый, крайне чувствительный организм. Управлять таким организмом вручную, без помощи автоматики, уже невозможно - просто потому, что человек физически не успевает обрабатывать лавину данных и выдавать точные команды со скоростью, необходимой для безопасного полёта.

Именно здесь вступает в игру автоматизированная система управления полётом - АСУП. Это не просто автопилот (хотя автопилот - её важная часть). Это комплекс, который отвечает за всё: от стабилизации углов крена и тангажа до построения оптимального маршрута с учётом ветра, загрузки, ограничений по шуму, и даже до автоматической посадки в густом тумане, когда командир видит только белое молоко за лобовым стеклом. Современная АСУП на таких лайнерах, как Airbus A350 или Boeing 787, способна самостоятельно выполнить полёт от «рулёжки до рулёжки», оставляя пилотам роль контролёров.

Однако прогресс не стоит на месте. Воздушное пространство становится всё более насыщенным, требования к точности выдерживания траектории - жёстче, а цены на топливо и экологические стандарты заставляют искать всё более изощрённые алгоритмы управления. Кроме того, на горизонте активно маячат технологии искусственного интеллекта (ИИ), которые обещают сделать полёты ещё более безопасными и эффективными. Например, ИИ мог бы прогнозировать турбулентность на минуту вперёд и заранее подбирать режим полёта, или же распознавать начинающийся отказ двигателя по микроскопическим колебаниям параметров раньше, чем это сделает штатная диагностика.

Но есть серьёзная загвоздка. Авиация - это сфера, где ошибки стоят человеческих жизней. Поэтому любые изменения в системе управления полётом должны быть не просто «хорошей идеей», а строго формализованными, проверенными и сертифицированными. И здесь возникает классическая инженерная проблема: как совместить мощь современных алгоритмов (включая нейросети) с железными требованиями стандартов DO-178C, DO-254 и ARP4754A, которые привыкли работать с детерминированными, предсказуемыми блоками кода? Как убедиться, что система, где искусственный интеллект принимает решения в условиях неопределённости, не совершит роковую ошибку?

Ответ на этот вопрос начинается с малого, но очень важного шага - с построения структурной модели. Структурная модель - это как чертёж скелета здания: она показывает, из каких крупных блоков состоит АСУП, как эти блоки связаны друг с другом, какие данные передают, кто кем управляет, и где находятся критические точки отказа. Без такой модели невозможно ни провести анализ рисков, ни верифицировать корректность работы, ни тем более сертифицировать систему. И если для обычных автопилотов прошлого поколения структурные модели хорошо известны и описаны в учебниках, то для систем с элементами ИИ, которые только входят в практику, методологий пока не хватает.

Именно эту лакуну и призвана заполнить наша работа. Цель данного исследования - разработать не просто очередную структурную модель, а полноценную

методологию её построения, которая была бы применима как для анализа уже существующих АСУП (чтобы выявлять в них скрытые уязвимости), так и для проектирования перспективных систем, где искусственный интеллект будет работать на правах «советника», а не полноценного командира. Мы опираемся на проверенные временем методы системного анализа, функциональное моделирование IDEF0 и теорию иерархических систем управления. И начинаем мы, как и положено, с «Метода исследования», где подробно разберём, что именно мы анализировали, как и почему.

Метод исследования

Любая серьёзная инженерная работа над такой сложной системой, как АСУП, начинается не с написания кода и не с пайки плат, а с чёткого понимания: «Что именно мы моделируем и зачем?». Поэтому наш метод исследования строился как многоэтапный процесс, сочетающий теоретический анализ, формальное описание архитектуры и компьютерное моделирование.

Первым делом мы проанализировали функциональную архитектуру современных систем управления полётом. Для этого мы взяли несколько эталонных образцов: гражданские лайнеры семейства Airbus A320/A330 (с их знаменитой электродистанционной системой управления fly-by-wire), Boeing 787 (с ещё более высокой степенью интеграции), а также военные транспортные самолёты и некоторые современные бизнес-джеты, где уровень автоматизации часто даже выше, чем на магистральных лайнерах. Нас интересовало, из каких крупных подсистем состоит АСУП, как эти подсистемы общаются друг с другом, какие у них протоколы и скорости передачи данных, и где находятся «узкие места» с точки зрения безопасности.

В результате мы выделили пять обязательных функциональных блоков, без которых не обходится ни одна современная АСУП:

- **Система автоматического управления (САУ)** - это классический автопилот и автомат тяги. Она замыкает контуры управления на себя: берёт сигналы с датчиков угловых скоростей, перегрузок, высоты и скорости и выдаёт команды на рули и двигатели, чтобы самолёт летел так, как задано.

- **Система управления полётом и навигации (FMS)** - «мозг», который решает, куда лететь и как. Пилот вводит маршрут, и FMS вычисляет оптимальную высоту, скорость, точки снижения. Он же выдаёт директорные сигналы для автопилота.

- **Бортовой вычислительный комплекс (БВК)** - это набор компьютеров, которые собирают, обрабатывают и распределяют данные. В современных самолётах их может быть до двух-трёх десятков, объединённых в сеть.

- **Системы предупреждения критических режимов** - GPWS (предупреждение о близости земли) и TCAS (предотвращение столкновений в воздухе). Они работают как независимые «адвокаты дьявола», готовые в любой момент взять управление на себя, чтобы увести самолёт от горы или другого борта.

- **Система представления информации** - те самые дисплеи в кабине, на которых пилот видит, что происходит.

Но просто перечислить блоки мало. Надо понять, как они взаимодействуют во времени. Например, пилот может вручную повернуть штурвал - это идёт в САУ, которая затем двигает рули. А может просто набрать новый курс на дисплее FMS, и уже FMS передаст команду в САУ, а САУ - на рули. А в случае отказа датчика скорости, автопилот должен автоматически переключиться на резервный режим по данным инерциальной системы. Все эти сценарии должны быть отражены в модели.

Второй ключевой момент - выбор нотации для описания модели. Мы перебрали несколько вариантов: потоки данных UML, сети Петри, обычные блок-схемы. Но остановились на методологии IDEF0. Почему? Потому что IDEF0 изначально разрабатывался в рамках программы ICAM для описания сложных промышленных систем,

где важны не только данные, но и управляющие воздействия, и «механизмы» (то есть ресурсы, которые выполняют функцию). Более того, IDEF0 является федеральным стандартом США (FIPS 183) и на протяжении десятилетий успешно применяется в аэрокосмической отрасли. Эта методология позволяет создать иерархию диаграмм: на верхнем уровне вы видите систему как один «чёрный ящик», а каждый последующий уровень раскрывает внутренности этого ящика всё детальнее, вплоть до отдельных алгоритмов. При этом стрелки на диаграммах имеют строгий смысл: «вход» - то, что преобразуется, «выход» - результат преобразования, «управление» - правила, ограничения, стандарты, «механизм» - исполнитель (компьютер, привод, человек). Такой подход идеально соответствует задачам авиационной сертификации, где требуется доказать, что каждая функция выполняется при наличии всех нужных условий.

Третий этап - собственно построение структурной модели и её верификация. Мы разбили АСУП на три иерархических уровня управления (стратегический, тактический, исполнительный) - это классика теории автоматического управления, но мы адаптировали её под авиационную специфику. На каждом уровне мы в нотации IDEF0 нарисовали функции, их входы/выходы, управляющие сигналы и механизмы. Например, на тактическом уровне функция «выдерживание заданной высоты» имеет вход - текущее значение барометрической высоты, управление - уставку от FMS (или ручки высот), механизм - алгоритм PID-регулятора в компьютере САУ, выход - команда на руль высоты.

Затем мы загрузили эту модель в специализированное ПО Enterprise Architect (для статического анализа) и в MATLAB/Simulink (для имитационного динамического моделирования). Статический анализ проверял, не потерялись ли какие-то стрелки, нет ли функций, у которых есть выход, но нет входа, и наоборот. А также - соблюдены ли требования по времени задержки в контурах. Например, в критическом контуре «датчик → вычислитель → привод» максимальная допустимая задержка по стандартам составляет не более 40 миллисекунд. Мы проверили, что в модели эта задержка не превышена.

Динамическое моделирование в Simulink было более зрелищным. Мы создали модель динамики среднемагистрального лайнера (уравнения движения, аэродинамические коэффициенты, модель двигателей, датчики с шумами). Затем «подключили» к этой модели нашу структурную АСУП и запустили типовые сценарии: прямолинейный горизонтальный полёт, набор высоты, разворот с креном 30°, заход на посадку с боковым ветром. Кроме того, мы сознательно вводили отказы: отказ одного из трёх каналов САУ (редундантные системы приняты в современной авиации), потерю сигнала GPS, отказ двух датчиков угловой скорости одновременно. Нас интересовало, как система ведёт себя в этих условиях и не уходит ли в расходящиеся колебания.

Наконец, отдельным блоком мы проработали вопрос интеграции искусственного интеллекта. Для этого мы дополнили модель специальным интеллектуальным модулем (ИМ), который работает на уровне стратегического планирования (а не в контуре непосредственного управления). ИМ получает данные о текущем состоянии, прогнозах погоды, отказах систем и выдаёт рекомендации экипажу или FMS. Архитектура ИМ гибридная: нейронная сеть глубокого обучения для распознавания паттернов отказов, нечёткая логика для оценки рисков при неполной информации и классические оптимизационные алгоритмы для перепланирования маршрута. Мы сознательно не даём ИМ права напрямую управлять рулями - это соответствует текущим требованиям EASA, изложенным в «Artificial Intelligence Roadmap 2.0». ИМ - это «советник», а не командир. Такой подход позволяет получить выгоды от ИИ (адаптивность, прогноз, снижение нагрузки на экипаж), не вступая в противоречие с требованиями к детерминированности критических функций.

Вся эта методология - от анализа до моделирования - была проведена нами для того, чтобы создать не просто ещё одну статью, а рабочий инструмент, который можно передать

в конструкторское бюро и сказать: «Вот структурная модель, вот проверенные алгоритмы, вот как встраивать ИИ, не нарушая сертификацию». Именно такой, прикладной и одновременно строгий, подход мы и считаем своим главным результатом.

Результаты и обсуждение

Структурная модель АСУП строится в соответствии с трёхуровневой иерархией. Первый уровень - стратегический - включает FMS, систему планирования полётного задания и подсистему взаимодействия с наземными службами управления воздушным движением (УВД). Этот уровень обеспечивает выработку плана полёта, оптимизацию маршрута и формирование директивных сигналов для нижележащих уровней.

Второй уровень - тактический - представлен системой автоматического управления (автопилот, автомат тяги, система управления траекторией). Данный уровень реализует выдерживание заданных траекторных параметров путём регулирования угловых скоростей и ускорений ВС. Алгоритмы управления второго уровня работают в полосе частот до 10 Гц.

Третий уровень - исполнительный - включает приводы аэродинамических поверхностей, систему управления тягой, а также системы непосредственного управления силами и моментами. Этот уровень обеспечивает реализацию управляющих воздействий с требуемой точностью и быстродействием (полоса частот до 100 Гц).

Межсистемный обмен данными в рамках АСУП осуществляется по стандартизированным интерфейсам. Для гражданских ВС наиболее широко применяются шины данных ARINC 429 (однонаправленная, скорость 100 кбит/с) и ARINC 664 (авиационный Ethernet, скорость до 100 Мбит/с). Для военных и перспективных гражданских применений используется шина MIL-STD-1553 (1 Мбит/с, с дублированием) и высокоскоростная оптоволоконная шина FC-AE-ASM.

Перспективным направлением развития АСУП является интеграция интеллектуального модуля (ИМ) на стратегическом уровне управления. ИМ выполняет функции адаптивного планирования маршрута при возникновении нештатных ситуаций, классификации отказных состояний по данным встроенного контроля, оценки уровня нагрузки на экипаж и автоматического перераспределения задач, а также прогнозирования технического состояния агрегатов и систем по данным системы HUMS.

Архитектура ИМ основана на сочетании нейросетевых методов глубокого обучения для задач классификации и распознавания образов, нечёткой логики для принятия решений в условиях неопределённости, а также классических алгоритмов оптимизации для задач маршрутизации и планирования.

Интеграция методов ИИ в сертифицированные авиационные системы сопряжена со значительными методологическими сложностями. Действующие нормы лётной годности (CS-25, FAR-25) и стандарты разработки программного обеспечения (DO-178C) ориентированы на детерминированные алгоритмы и не предусматривают процедур сертификации нейросетевых компонентов. Разработанная структурная модель позволяет чётко определить границы применения ИИ-методов - только в рамках систем поддержки принятия решений без прямого участия в критических контурах управления.

В соответствии с рекомендациями EASA, предложено выделить ИМ в отдельный уровень DA (Decision Assistance), взаимодействующий с основными контурами управления через стандартизированный интерфейс. Это позволяет применять к ИМ менее строгие требования DAL (Design Assurance Level C/D) и упростить процедуру сертификации.

Разработанная структурная модель АСУП была верифицирована с использованием методов статического анализа и имитационного моделирования. Статический анализ включал проверку полноты покрытия функциональных требований, отсутствия «тупиковых» информационных потоков и выполнения требований к задержкам в критических контурах. Для верификации использовалось программное обеспечение DOORS и Enterprise Architect.

Имитационное моделирование проводилось в среде MATLAB/Simulink на модели динамики ВС класса среднемагистрального авиалайнера. Были исследованы переходные процессы в контурах управления, оценены запасы устойчивости по амплитуде и фазе, а также проведено моделирование нештатных ситуаций: отказ одного из каналов САУ, потеря сигнала GPS и одновременный отказ нескольких датчиков.

Результаты верификации показали соответствие разработанной модели функциональным требованиям в 97,3% случаев. Выявленные несоответствия касались преимущественно граничных случаев при одновременном возникновении нескольких отказов и были устранены путём введения дополнительных логических связей между блоками.

Заключение

В статье представлена методология построения структурной модели АСУП, основанная на применении функциональной методологии IDEF0 и трёхуровневой иерархической архитектуры управления. Разработанная модель охватывает весь состав функций АСУП - от стратегического планирования полётно заданного до исполнения управляющих воздействий, а также обеспечивает систематизированное описание информационных потоков и интерфейсов.

Предложена концепция интеграции интеллектуального модуля на основе методов ИИ в контур управления, обеспечивающая повышение уровня автоматизации без нарушения требований лётной годности. Результаты верификации на имитационной модели подтвердили корректность и полноту разработанной структурной модели. Дальнейшие работы направлены на апробацию модели в рамках проектирования конкретного образца АСУП для регионального воздушного судна казахстанской разработки.

Список использованных источников

1. Воробьёв В.Г., Глухов В.В., Козловский В.В. Автоматическое управление полётом самолётов и вертолётов. - М.: Транспорт, 1983. - 424 с.
2. Briere D., Traverse P. Airbus A320/A330/A340 Electrical Flight Controls - A Family of Fault-Tolerant Systems // Proceedings FTCS-23. - 1993. - P. 616–623.
3. Тимошенко А.В., Баженов А.И. Системы управления полётом: теория и проектирование. - СПб.: Политехника, 2018. - 376 с.
4. SAE ARP4754A. Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems. - Warrendale: SAE International, 2010.
5. RTCA DO-178C. Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification. - Washington: RTCA, 2011.
6. Куликов Г.Г., Брейкин Т.В., Арьков В.Ю. Методы автоматического управления в авиационных системах. - Уфа: УГАТУ, 2017. - 292 с.
7. EASA. Artificial Intelligence Roadmap 2.0: Human-centric Approach to AI in Aviation. - Cologne: EASA, 2023. - 112 p.
8. Dzielski J., Kurdila A. A Benchmark Control Problem for Population Balance Simulation and Control of Aerospace Avionics Systems // Aerospace Science and Technology. - 2005. - Vol. 9, No. 4. - P. 281–295.

УДК 811

A.A.Yergazina

T.Ya. Begeldinov Military Institute of Air Defense Forces

Aktobe, Republic of Kazakhstan

aliya_visvo@mail.ru

THE CONCEPT, ESSENCE, AND CLASSIFICATION OF MILITARY AVIATION TERMINOLOGY

Аңдатпа: Мақала әскери авиация және халықаралық кәсіби коммуникация саласында қызмет ететін кәсіби тілдің мамандандырылған ішкі жүйесі ретінде әскери авиациялық терминологияның ұғымын, мәнін және жіктелуін зерттеуге арналған. Зерттеудің өзектілігі болашақ авиация мамандарын даярлау үдерісінде ағылшын тілінің рөлінің артуымен, кәсіби қарым-қатынасты стандарттау қажеттілігімен, сондай-ақ авиация және әскери салалардағы халықаралық өзара іс-қимылдың кеңеюімен айқындалады. Инженерлік бейіндегі курсанттарды кәсіби бағытта оқыту үдерісіндегі әскери авиациялық терминологияның маңыздылығына ерекше назар аударылады. Жұмыста «термин» ұғымын анықтаудың негізгі тәсілдері қарастырылып, әскери авиациялық терминологияның жүйелілік, дәлдік, стандартталғандық, ықшамдылық және функционалдық бағыттылық сияқты ерекше белгілері талданады. Терминологиялық бірліктердің құрылымдық және семантикалық сипаттамалары, сондай-ақ термин жасаудың ең өнімді тәсілдері – аффиксация, сөзқұрастыру, аббревиация, акронимия және терминологиялық сөз тіркестері зерттеледі. Зерттеуде авиациялық радиоалмасу мен кәсіби дискурстағы терминологияның қызмет ету мәселелері ерекше орын алады. Мақалада әскери авиациялық терминологияның тақырыптық, құрылымдық және функционалдық белгілері бойынша жіктелуі ұсынылған. Авиациялық техникаға, қару-жаракқа, навигацияға, радиоалмасуға және авиациялық техниканы техникалық қызмет көрсетуге қатысты терминдер қарастырылады. Терминологияның тек кәсіби коммуникация құралы ғана емес, сонымен қатар болашақ авиация мамандарының кәсіби ойлауын қалыптастыру құралы ретінде де қызмет атқаратыны атап көрсетіледі. Зерттеудің әдіснамалық негізін сипаттамалық, құрылымдық-семантикалық, классификациялық, контекстуалдық және салыстырмалы-салғастырмалы талдау әдістері құрайды. Зерттеу материалы ретінде ағылшын тіліндегі авиациялық сөздіктер, ICAO мен NATO терминологиялық стандарттары, түпнұсқалық кәсіби мәтіндер және авиациялық радиоалмасу үлгілері пайдаланылды. Зерттеудің практикалық маңыздылығы оның нәтижелерін әскери жоғары оқу орындарының инженерлік бейіндегі курсанттарына авиациялық ағылшын тілін оқытуға арналған оқу құралдарын, терминологиялық сөздіктерді және әдістемелік материалдарды әзірлеуде пайдалану мүмкіндігімен айқындалады. Жүргізілген жіктеу терминологиялық бірліктерді әртүрлі негіздер бойынша жүйелеуге және әскери авиацияның қызмет етуінің негізгі бағыттарын көрсететін ең маңызды тақырыптық топтарды анықтауға мүмкіндік берді. Ең көп таралған терминдер қатарына авиациялық техника мен оның құрамдас бөліктерін, әуе қозғалысын басқару жүйелерін, авиациялық қару-жаракты, байланыс және навигация құралдарын, сондай-ақ әуе кемелерін техникалық пайдалану мен қызмет көрсету үдерістерін білдіретін терминдер жататыны анықталды.

Түйін сөздер: Әскери авиациялық терминология, авиациялық ағылшын тілі, термин, терминология, әскери дискурс, кәсіби коммуникация, терминжасам, аббревиация, акронимия, терминологиялық құзыреттілік, авиациялық радиоалмасу, кәсіби бағытталған оқыту, инженерлік бейіндегі курсанттар, авиациялық лексика, әскери авиация.

Abstract: The article is devoted to the study of the concept, essence, and classification of military aviation terminology as a specialized subsystem of professional language functioning in

the field of military aviation and international professional communication. The relevance of the study is determined by the increasing role of the English language in the training of future aviation specialists, the necessity of standardizing professional communication, and the expansion of international cooperation in the aviation and military sectors. Particular attention is paid to the significance of military aviation terminology in the process of professionally oriented language training of engineering cadets. The paper examines the main approaches to defining the concept of a “term” and analyzes the specific features of military aviation terminology, including systematicity, precision, standardization, conciseness, and functional orientation. The structural and semantic characteristics of terminological units are investigated, as well as the most productive methods of term formation, such as affixation, compounding, abbreviation, acronym formation, and terminological word combinations. Special emphasis is placed on the functioning of terminology in aviation radiotelephony communication and professional discourse. The article presents a classification of military aviation terminology according to thematic, structural, and functional criteria. The study considers terms related to aviation engineering, armament, navigation, radiotelephony communication, and aircraft maintenance. It is noted that terminology serves not only as a means of professional communication but also as a tool for the development of the professional thinking of future aviation specialists. The methodological framework of the research is based on descriptive, structural-semantic, classificatory, contextual, and comparative methods of analysis. The research material includes English-language aviation dictionaries, ICAO and NATO terminological standards, authentic professional texts, and samples of aviation radiotelephony communication. The practical significance of the study lies in the possibility of applying its results in the development of textbooks, terminological dictionaries, and methodological materials for teaching Aviation English to engineering cadets of military higher educational institutions.

Keywords: Military aviation terminology, Aviation English, term, terminology, military discourse, professional communication, terminology formation, abbreviation, acronymization, terminological competence, aviation radiotelephony communication, professionally oriented language training, engineering-profile cadets, aviation lexis, military aviation.

Аннотация: Статья посвящена исследованию понятия, сущности и классификации военной авиационной терминологии как специализированной подсистемы профессионального языка, функционирующей в сфере военной авиации и международной профессиональной коммуникации. Актуальность исследования обусловлена возрастающей ролью английского языка в подготовке будущих авиационных специалистов, необходимостью стандартизации профессионального общения, а также расширением международного взаимодействия в авиационной и военной сферах. Особое внимание уделяется значению военной авиационной терминологии в процессе профессионально-ориентированного обучения курсантов инженерного профиля. В работе рассматриваются основные подходы к определению понятия «термин» и анализируются специфические особенности военной авиационной терминологии, включая системность, точность, стандартизованность, лаконичность и функциональную направленность. Исследуются структурные и семантические характеристики терминологических единиц, а также наиболее продуктивные способы терминообразования: аффиксация, словосложение, аббревиация, акронимия и терминологические словосочетания. Особое место в исследовании занимают вопросы функционирования терминологии в авиационном радиообмене и профессиональном дискурсе. В статье представлена классификация военной авиационной терминологии по тематическим, структурным и функциональным признакам. Рассматриваются термины авиационной техники, вооружения, навигации, радиообмена и технического обслуживания авиационной техники. Отмечается, что терминология выступает не только средством профессиональной коммуникации, но и инструментом формирования профессионального мышления будущих авиационных специалистов.

Методологическую основу исследования составили описательный, структурно-семантический, классификационный, контекстуальный и сравнительно-сопоставительный методы анализа. Материалом исследования послужили англоязычные авиационные словари, терминологические стандарты ИКАО и НАТО, аутентичные профессиональные тексты и образцы авиационного радиообмена. Практическая значимость исследования заключается в возможности использования его результатов при разработке учебных пособий, терминологических словарей и методических материалов по обучению авиационному английскому языку курсантов инженерного профиля военных вузов. Проведенная классификация позволила систематизировать терминологические единицы по различным основаниям и определить наиболее значимые тематические группы, отражающие ключевые направления функционирования военной авиации. Выявлено, что наиболее многочисленными являются термины, обозначающие авиационную технику и ее составные части, системы управления воздушным движением, авиационное вооружение, средства связи и навигации, а также процессы технической эксплуатации и обслуживания воздушных судов. Кроме того, существенную группу составляют термины авиационного радиообмена, обеспечивающие оперативность и безопасность профессиональной коммуникации в условиях выполнения полетных задач.

Ключевые слова: Военная авиационная терминология, авиационный английский язык, термин, терминология, военный дискурс, профессиональная коммуникация, терминообразование, аббревиация, акронимия, терминологическая компетенция, авиационный радиообмен, профессионально-ориентированное обучение, курсанты инженерного профиля, авиационная лексика, военная авиация.

Introduction

The current stage of military aviation development is characterized by the intensive implementation of innovative technologies, the expansion of international cooperation, the standardization of professional communication, and the growing role of the English language as a universal means of interaction among aviation professionals. In the context of the globalization of the aviation industry and the integration of national military education systems into the international professional environment, the study and systematization of military aviation terminology have become particularly important.

Military aviation terminology represents a complex and dynamically developing system of specialized linguistic units serving the professional domain of military aviation. It reflects the specific nature of the professional activities of pilots, aviation engineers, air traffic controllers, maintenance specialists, and command personnel. This type of terminology ensures accuracy in information transfer, standardization of professional communication, and effective interaction under conditions of high responsibility and limited time.

The relevance of the study is determined by the need for a comprehensive examination of the nature and structure of military aviation terminology in the context of professionally oriented foreign language instruction for cadets of military higher education institutions. In modern conditions, proficiency in English aviation terminology has become an essential component of the professional competence of future aviation specialists. This is especially important for engineering cadets whose professional activities are directly related to the operation, maintenance, and diagnostics of aviation equipment.

Military aviation terminology possesses a number of specific characteristics. It is distinguished by a high degree of standardization, precision, conciseness, and international unification. A significant place within this terminology is occupied by abbreviations, acronyms, terminological word combinations, and standardized radiotelephony commands. Another important feature is the close relationship between terminology, the professional thinking of specialists, and their practical activities within the aviation environment.

Modern linguistics demonstrates an increasing interest in the study of professional sublanguages and specialized terminological systems. Military aviation terminology constitutes one of the most complex and dynamic layers of professional vocabulary, as it is continuously enriched with new units resulting from advances in aviation technology, weapon systems, digital technologies, and international standards of professional interaction.

The purpose of this study is to define the concept and essence of military aviation terminology and to identify the main principles of its classification. To achieve this objective, the following tasks are to be accomplished: to examine the theoretical foundations of the concept of “term”; to determine the specific features of military aviation terminology as a specialized system; to identify the structural, semantic, and functional characteristics of terminological units; and to analyze existing approaches to the classification of military aviation terminology.

The practical significance of the study lies in the possibility of applying its findings in professionally oriented English language instruction for engineering cadets, as well as in the development of textbooks, terminological dictionaries, and methodological materials on Aviation English.

Research Methods

To achieve the stated objective, a set of interrelated linguistic research methods was employed, ensuring a comprehensive study of military aviation terminology.

The primary research method was the descriptive method, aimed at identifying, systematizing, and characterizing terminological units of the English military aviation language. The application of this method made it possible to determine the essential characteristics of the terminology, identify its structural features, and establish patterns of term functioning within professional discourse.

The method of continuous sampling was used to select linguistic material from specialized sources, including English-language aviation dictionaries, ICAO and NATO terminological reference materials, Aviation English textbooks, technical documentation, aircraft maintenance manuals, and professional radiotelephony communication materials.

The classification method was applied to systematize terms according to thematic, structural, and functional criteria. This approach enabled the identification of the main groups of terms and the determination of their place within the overall system of professional communication.

Results and Discussion

Terminology is a set of specialized linguistic units used to designate concepts within a particular professional field. In scholarly literature, a term is defined as a word or phrase that precisely denotes a specialized concept and functions within a system of professional knowledge.

Military aviation terminology is a component of general military terminology and, at the same time, forms part of the aviation professional language system. It comprises a set of terms used to designate objects, processes, phenomena, and actions related to military aviation.

The essence of military aviation terminology lies in its ability to facilitate professional communication and represent specialized knowledge. Terminology reflects the specific nature of the professional activities of aviation specialists and serves as an instrument of professional thinking.

E.S. Kubryakova notes that language serves as a means of storing, organizing, and transmitting knowledge [1]. In this context, terminology represents a cognitive system through which the conceptualization of professional reality is carried out.

Military aviation terminology is a specialized subsystem of language that serves the field of military aviation and ensures precise, unambiguous, and standardized professional communication. In academic literature, terminology is viewed as a set of terms—words or phrases that designate concepts within a particular field of knowledge or activity. In the military context,

it acquires special significance because it is associated with ensuring safety, managing complex technical systems, and coordinating actions under conditions of heightened responsibility.

According to contemporary approaches, military terminology as a whole is defined as a set of linguistic means used within the armed forces to designate military objects, processes, and phenomena. It is characterized by a high degree of specificity, standardization, and a restricted sphere of use. Military aviation terminology, being a component of military terminology, integrates elements of both general military and aviation terminological systems, thereby forming an independent lexical-semantic subsystem.

The essence of military aviation terminology is manifested in its functional orientation. First and foremost, it performs a nominative function by providing names for objects and processes related to aviation activities (for example, types of aircraft, structural components, and flight maneuvers). In addition, its communicative function is of great importance, as it ensures effective interaction among participants in aviation operations. In the context of radiotelephony communication and air traffic management, terminology must be as precise, concise, and unambiguous as possible. For this reason, international organizations such as the International Civil Aviation Organization develop standardized systems of terminology and phraseology aimed at ensuring flight safety.

Thus, aviation phraseology is defined as a system of standardized linguistic means used in radiotelephony communication between pilots and air traffic controllers, the purpose of which is to enhance the accuracy and efficiency of communication. The use of strictly regulated terms and expressions eliminates ambiguity and reduces the likelihood of errors. Moreover, regulatory documents emphasize the necessity of avoiding jargon and colloquial language in professional communication, as they may lead to misunderstandings.

From a linguistic perspective, military aviation terminology possesses a number of specific characteristics. First, it is distinguished by a high degree of systematicity and hierarchical organization: terms are grouped into thematic categories such as navigation, flight control, armament, and maintenance. Second, it demonstrates a tendency toward unification and internationalization, which is associated with the global nature of aviation activities. In this regard, the English language functions as the lingua franca of aviation, providing a unified terminological framework.

A special place within the structure of military aviation terminology is occupied by abbreviations and acronyms (e.g., ATC – Air Traffic Control, AWACS – Airborne Warning and Control System), which make it possible to reduce the volume of transmitted information and accelerate communication. Alongside these, fixed collocations and standardized formulaic expressions are widely used, forming the foundation of professional discourse.

The classification of military aviation terminology can be based on various criteria. One of the most widely used approaches is the thematic principle, according to which the following groups are distinguished:

- Terms denoting aircraft and their characteristics (for example, types of aircraft and categories of airplanes).
- Navigation and piloting terminology related to flight control, routes, and spatial orientation.
- Radiocommunication and air traffic control terminology, including standardized phraseology and command expressions.
- Technical terminology covering the design, operation, and maintenance of aviation equipment.
- Military operational terminology associated with the combat employment of aviation, types of operations, and weapon systems.

Another important basis for classification is the structural criterion. According to this approach, the following categories are identified:

- simple terms (single-word units);

- compound terms (multi-word expressions and terminological phrases);
- abbreviations and acronyms;
- terminological combinations containing prepositions and function words.

The semantic classification of military aviation terminology involves distinguishing terms according to their degree of abstraction and concreteness, as well as the type of objects they designate (processes, properties, devices, etc.). In addition, a distinction can be made between normative (standardized) and non-normative (variant) terms. In the aviation field, priority is given to normative terminology that is established in international documents and glossaries.

Continuing the examination of the essence of military aviation terminology, it is necessary to consider its scholarly interpretation in modern linguistics and terminology studies. A number of studies emphasize that military aviation terminology develops as a dynamic system reflecting advances in science, technology, and military affairs. Thus, L.R. Isaeva and E.V. Shestakova regard military aviation vocabulary as an actively evolving terminological sphere that is continuously enriched through derivational processes, which demonstrates its open and productive nature [2].

From the perspective of terminology studies (V.M. Leichik, D.S. Lotte, and others), the terminological system of any field is not a chaotic collection of units but rather an organized set based on logical and conceptual relationships [3; 4]. In this context, military aviation terminology can be defined as a hierarchically organized system in which each term is associated with a specific scientific or technical concept and occupies a clearly defined place within the overall system of knowledge. This characteristic is further confirmed by the fact that military terminology as a whole is regarded as a formalized system with clearly established meanings and defined areas of application.

An important aspect concerns the sources of military aviation terminology formation. Researchers note that one of the leading mechanisms of its development is borrowing, particularly from the English language, due to the dominant role of English-language scientific and technical communication. Military aviation terminology is actively enriched through simple and compound words, multi-component terms, and abbreviations, while the borrowing process is accompanied by the transfer of the corresponding concepts [5].

Equally important is the structural-semantic analysis of terminology. In the studies conducted by S.B. Fomina, it is emphasized that aviation terminology functions primarily within scientific and technical texts, where it serves as a means of transmitting specialized knowledge and is characterized by the combination of scientific and technical components [6]. This makes it possible to regard military aviation terminology as an interdisciplinary phenomenon situated at the intersection of linguistics, technology, and military science.

From the perspective of classification, contemporary researchers propose a multidimensional approach to the systematization of military aviation terminology. Thus, based on derivational analysis, the following groups of terms are distinguished according to their word-formation patterns:

- affixational formations;
- compound (composite) terms;
- abbreviations and acronyms;
- terminological word combinations.

Within the framework of the semasiological approach, A.E. Solovyova classifies military aviation terminology according to the type of objects designated [7]:

- object terms (e.g., *aircraft*, *radar*);
- process terms (e.g., *navigation*, *targeting*);
- property terms (e.g., *altitude*, *speed*);
- action terms (e.g., *launch*, *intercept*).

The functional approach involves distinguishing the following groups of military aviation terminology:

1. **Operational and tactical terminology**, related to the combat employment of aviation (e.g., *air strike*, *air combat*).

2. **Technical terminology**, reflecting the design, operation, and maintenance of aviation equipment.

3. **Organizational and structural terminology**, describing military units and organizational structures (e.g., *squadron*, *wing*).

4. **Communication and air traffic control terminology**, including standardized commands and phraseology.

Each of these groups is closely connected with specific areas of professional activity. For example, such terms as *air strike* have a clearly defined classification according to various parameters (composition of forces, type of weaponry), which reflects their functional role in military practice.

Special attention in scholarly literature is devoted to the issue of terminology standardization. Military aviation terminology is characterized by a high degree of regulation and standardization because its use is directly associated with safety and the effective accomplishment of operational tasks. Consequently, a significant number of terms are codified in regulatory documents, military manuals, instructions, and specialized dictionaries.

Another important area of research concerns interlingual correspondences and translation aspects of military aviation terminology. It has been established that the translation of terms requires consideration not only of their lexical meanings but also of the conceptual differences between the terminological systems of different languages. This issue is particularly relevant in the context of international military cooperation and interaction.

According to the concept proposed by D.S. Lotte, a term should possess such characteristics as unambiguity, precision, systematicity, and stylistic neutrality [8]. Developing this idea further, V.M. Leichik emphasizes that a term is not merely a word but an element of a strictly organized system of knowledge reflecting a professional worldview [9].

In the context of military aviation, terminology acquires additional characteristics determined by the specific nature of professional activity. As noted by A.V. Superanskaya, terminological systems in technical fields are distinguished by a high degree of standardization and normativity [10]. This is particularly relevant to military aviation, where terminological precision is directly linked to flight safety and the effective execution of combat missions.

Military aviation terminology represents an integrative system that combines the features of both military and aviation terminology. Its essence is manifested through a number of key characteristics:

1. Systematicity and Hierarchical Organization

Terms are organized into clearly structured subsystems reflecting various aspects of aviation activity, including flight control, navigation, armament, maintenance, and other related fields.

2. Standardization

A significant number of terms are codified in regulatory documents developed by organizations such as the International Civil Aviation Organization. This ensures uniformity and consistency in professional communication at the international level.

3. International Character

As noted by V.P. Danilenko, modern scientific and technical terminology develops under conditions of globalization, which has led to the dominant role of the English language [11]. In the aviation sector, this tendency is particularly evident, as English functions as the universal language of professional communication.

4. Dynamism

The development of aviation equipment and military technologies results in the continuous renewal of the terminological inventory. New terms emerge through:

- neologization (*drone*, *stealth*);

- borrowing from other languages;
- the terminologization of general-language vocabulary.

5. Economy of Linguistic Means

The widespread use of abbreviations and acronyms (e.g., *UAV*, *ATC*, *IFR*) is обусловлено the need for rapid and efficient transmission of information.

The classification of military aviation terminology is multidimensional in nature and may be carried out according to various criteria.

Thematic Classification

The most common classification is the thematic classification, which reflects specific professional domains:

1. **Flight Operations Terminology** (*altitude, climb rate, stall*).
2. **Navigation Terminology** (*heading, waypoint, bearing*).
3. **Technical Terminology** (*engine thrust, airframe, avionics*).
4. **Military Operational Terminology** (*target acquisition, air strike, interception*).
5. **Air Traffic Management Terminology** (*clearance, holding pattern, approach*).

This classification reflects the functional distribution of terms within professional activities.

Structural Classification

From a structural perspective, the following categories can be distinguished:

- **Simple terms:** *radar, missile*;
- **Compound terms:** *flight deck, combat radius*;
- **Multi-component terms:** *beyond-visual-range missile*;
- **Abbreviations and acronyms:** *AWACS, NATO*.

The most productive model is the formation of multi-component terms, which reflect complex professional concepts.

Semantic Classification

According to the type of meaning, terms are divided into:

- **Object terms:** *aircraft, radar*;
- **Process terms:** *navigation, targeting*;
- **Property terms:** *supersonic, stealth*;
- **Action terms:** *launch, intercept*.

This approach makes it possible to identify the logical and conceptual relationships within the terminological system.

Functional Classification

The functional approach involves distinguishing the following categories:

- terms describing objects;
- command and control terms;
- analysis and evaluation terms;
- interaction and communication terms.

A special place is occupied by standardized radiotelephony phraseology, which plays a crucial role in ensuring flight safety.

One of the key challenges is maintaining terminological uniformity in international practice. In the context of multilingual interaction, particular importance is attached to regulatory documents governing the use of terminology.

Conclusion

The conducted study has demonstrated that military aviation terminology constitutes a complex specialized system of linguistic units serving the professional domain of military aviation and ensuring effective professional communication.

Military aviation terminology possesses a number of specific characteristics, including systematicity, standardization, precision, conciseness, and international unification. A special

place within this system is occupied by abbreviations, acronyms, terminological word combinations, and standardized radiotelephony communication structures.

The study has established that the essence of military aviation terminology lies not only in the designation of specialized concepts but also in the representation of professional knowledge, the formation of professional thinking, and the facilitation of effective interaction among aviation specialists.

The research examined the principal approaches to terminology classification: thematic, structural, and functional. This made it possible to determine the internal organization of the terminological system and identify its main components.

The practical significance of the study lies in the possibility of applying its findings to the development of textbooks, specialized dictionaries, electronic educational resources, and methodological guidelines for teaching Aviation English to cadets of military higher education institutions.

The study and systematization of military aviation terminology are of considerable importance for the development of effective teaching methodologies for engineering cadets, since the formation of terminological competence is a key prerequisite for their successful professional activity.

References

1. Kubryakova, E.S. *Language and Knowledge: Towards Acquiring Knowledge about Language: Parts of Speech from a Cognitive Perspective. The Role of Language in Understanding the World*. Moscow: Languages of Slavic Culture Publishers, 2004. 560 p.
2. Isaeva, L.R., & Shestakova, E.V. Derivational Features of Military Aviation Vocabulary. *Bulletin of Chelyabinsk State University. Philological Sciences*, 2021, No. 1 (447), Issue 123, pp. 61–66.
3. Lotte, D.S. *How to Work on Terminology: Fundamentals and Methods*. Moscow: Nauka Publishers, 1968. 78 p.
4. Leichik, V.M. *Terminology Studies: Subject Matter, Methods, and Structure*. 5th ed. Moscow: LIBROKOM Publishing House, 2009. 256 p.
5. Solovyova, A.E. Military Helicopter Aviation Terminology as an Object of Linguistic Research (Based on English, Russian, and Turkish Languages). *Philological Sciences. Issues of Theory and Practice*, 2018, No. 4 (82), Part 1, pp. 172–176.
6. Fomina, S.B. Lexical and Structural Characteristics of Aviation Terminology and Methods of Its Translation into Russian. *Philological Sciences at MGIMO University*, 2022, Vol. 8, No. 1 (30), pp. 70–79.
7. Solovyova, A.E. Military Helicopter Aviation Terminology as an Object of Linguistic Research (Based on English, Russian, and Turkish Languages). *Philological Sciences. Issues of Theory and Practice*, 2018, No. 4 (82), Part 1, pp. 172–176.
8. Lotte, D.S. *Fundamentals of Scientific and Technical Terminology Formation: Issues of Theory and Methodology*. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1961. 158 p.
9. Leichik, V.M. *Terminology Studies: Subject Matter, Methods, and Structure*. 3rd ed. Moscow: LKI Publishers, 2007. 256 p.
10. Superanskaya, A.V., Podolskaya, N.V., & Vasilyeva, N.V. *General Terminology: Theoretical Issues*. Edited by T.L. Kandelaki. Moscow: Nauka Publishers, 1989. 246 p.
11. Danilenko, V.P. *Russian Terminology: An Experience of Linguistic Description*. Edited by F.P. Filin. Moscow: Nauka Publishers, 1977. 246 p.

ӘСКЕРИ-ҚОЛДАНБАЛЫ ҒЫЛЫМДАР

УДК: 78.25.14.

Е.К.Садвокасов

*Военный институт Сил Воздушной обороны имени Т.Ж. Бигелдинова
Республика Казахстан, город Актөбе,*

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ РАДИОЛОКАЦИИ В
ОБЕСПЕЧЕНИИ ПОЛЁТОВ

Андатпа: Бұл мақалада азаматтық авиациядағы ұшу қауіпсіздігін қамтамасыз ету жүйесінде қолданылатын заманауи радиолокациялық құралдарға кешенді және жүйелі талдау жасалған. Зерттеудің өзектілігі әуе қозғалысының қарқынды өсуімен, авиация саласының цифрландырылуымен және әуе кеңістігі құрылымының күрделенуімен байланысты. Сонымен қатар әуе трассалары тығыздығының артуы, халықаралық бағыттардың кеңеюі және авиациялық қауіпсіздікке қойылатын талаптардың күшеюі дәлдік, сенімділік және бақылау жүйелерінің тұрақтылығын арттыру қажеттілігін туындатады. Жұмыста радиолокацияның теориялық негіздері, электромагниттік толқындардың шығарылуы, таралуы, шағылуы және шашырауының физикалық принциптері, сондай-ақ радиолокациялық сигналдың қалыптасу механизмдері қарастырылған. Әуе объектілерінің координаттарын анықтау әдістері, оның ішінде қашықтық, азимут және биіктік параметрлері, сондай-ақ Доплер эффектісі негізінде жылдамдықты есептеу тәсілдері ашып көрсетілген. Радиолокациялық ақпаратты өңдеу ерекшеліктеріне, көпсәулелі таралу жағдайларына, атмосфералық кедергілер мен шу әсеріне ерекше назар аударылған. Бастапқы және екіншілік радиолокациялық жүйелерге, олардың құрылымына, жұмыс принциптеріне, дәлдік сипаттамалары мен пайдалану шектеулеріне жан-жақты талдау жүргізілген. Mode S режиміндегі екіншілік радиолокаторлардың ерекшеліктері қарастырылып, әуе кемелерін адрес бойынша сәйкестендіру, навигациялық ақпарат алмасу және диспетчерлік басқару тиімділігін арттыру мүмкіндіктері көрсетілген. Сонымен қатар ADS-B жүйесі, фазаланған антенналық торлары бар радиолокациялық кешендер және мультистатикалық таралған жүйелер зерттелді. Олардың артықшылықтары мен шектеулері талданып, киберқауіптерге осалдық, спутниктік навигацияға тәуелділік және жаһандық стандарттаудың қажеттілігі атап өтілді. Зерттеу әдістемесі жүйелік талдау, салыстырмалы модельдеу, құрылымдық-функционалдық тәсіл және халықаралық тәжірибені жалпылауға негізделген. Практикалық маңыздылығы радиолокациялық және спутниктік технологияларды біріктіретін гибридік бақылау жүйелеріне көшу қажеттілігін негіздеуде жатыр. Қорытындыда радиолокациялық технологиялардың болашақ дамуы олардың интеллектуалдандырылуымен, цифрлық трансформациясымен, жасанды интеллект алгоритмдерін енгізумен және әуе қозғалысын басқарудың жаһандық интеграцияланған жүйесін қалыптастырумен байланысты екені көрсетілген.

Түйін сөздер: Радиолокация, авиациялық қауіпсіздік, әуе қозғалысын басқару, ADS-B, Mode S, радиолокациялық жүйелер, фазаланған антенналық торлар, мультистатикалық жүйелер, авиацияны цифрландыру, спутниктік навигация, радиолокациялық сигналдарды өңдеу, әуе кеңістігі

Abstract: This article presents a comprehensive and systematic analysis of modern radar systems used in ensuring flight safety in civil aviation under conditions of rapidly increasing air traffic, digital transformation of the aviation industry, and growing complexity of airspace structure. The relevance of the study is driven by the need to improve the accuracy, reliability, and stability of air surveillance systems amid increasing traffic density, expanding international routes, and higher aviation safety requirements. The study examines the theoretical foundations of radar,

including the physical principles of electromagnetic wave emission, propagation, reflection, and scattering, as well as mechanisms of radar signal formation. Methods for determining the coordinates of airborne objects, including range, azimuth, and altitude, as well as velocity estimation based on the Doppler effect, are described. Special attention is given to signal processing under multipath propagation, atmospheric disturbances, and noise interference affecting measurement accuracy. A detailed system analysis of primary and secondary radar systems is conducted, including their architecture, operating principles, accuracy characteristics, and operational limitations. Particular attention is given to secondary surveillance radar operating in Mode S, enabling aircraft identification, enhanced data exchange, and improved air traffic control efficiency. Modern surveillance technologies are also analyzed, including ADS-B systems, phased array radar systems, and multistatic distributed radar networks. Their advantages, such as improved positioning accuracy, extended detection range, resistance to interference, and reduced ground infrastructure load, are discussed alongside limitations, including vulnerability to cyber threats, dependence on satellite navigation, and the need for global standardization. The research methodology is based on system analysis, comparative modeling, structural-functional approaches, and synthesis of international operational experience. The practical significance lies in justifying the transition toward integrated hybrid surveillance systems combining radar and satellite technologies into a unified information environment. The study concludes that the future development of radar technologies is associated with their intellectualization, digital transformation, implementation of artificial intelligence algorithms, and the formation of a globally integrated air traffic management system ensuring high levels of safety and operational efficiency.

Keywords: Radar systems, aviation safety, air traffic control, ADS-B, Mode S, radar surveillance systems, phased array antennas, multistatic systems, aviation digitalization, satellite navigation, radar signal processing, airspace management

Аннотация: В статье представлен комплексный и системный анализ современных средств радиолокации, применяемых в системе обеспечения безопасности полётов гражданской авиации в условиях глобального роста интенсивности воздушного движения, цифровизации авиационной отрасли и усложнения структуры воздушного пространства. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения точности, надёжности и устойчивости систем наблюдения за воздушной обстановкой при одновременном увеличении плотности воздушных трасс, расширении международных маршрутов и росте требований к авиационной безопасности. В работе подробно рассмотрены теоретические основы радиолокации, включающие физические принципы излучения, распространения, отражения и рассеяния электромагнитных волн, а также механизмы формирования радиолокационного сигнала. Раскрыты методы определения координат воздушных объектов, включая дальность, азимут и высоту, а также способы расчёта скорости на основе доплеровского эффекта. Отдельное внимание уделено особенностям обработки радиолокационной информации в условиях многолучевого распространения, атмосферных помех и шумовых искажений, влияющих на точность измерений. Проведён детальный системный анализ первичных и вторичных радиолокационных систем, их архитектуры, принципов работы, точностных характеристик и эксплуатационных ограничений. Рассмотрены особенности вторичных радиолокаторов с режимом Mode S, обеспечивающим адресную идентификацию воздушных судов, расширенный обмен навигационной информацией и повышение эффективности диспетчерского управления воздушным движением. Дополнительно исследованы современные технологии наблюдения, включая систему ADS-B, радиолокационные комплексы с активными фазированными антенными решётками и мультистатические распределённые системы. Подробно рассмотрены их функциональные преимущества, такие как повышение точности позиционирования, увеличение дальности обнаружения, устойчивость к помехам и снижение нагрузки на наземную инфраструктуру, а также

выявлены ограничения, включая уязвимость к кибератакам, зависимость от спутниковой навигации и необходимость глобальной стандартизации. Методологическая основа исследования включает системный анализ, сравнительное моделирование, структурно-функциональный подход и обобщение международного опыта эксплуатации авиационных радиолокационных систем. Практическая значимость работы заключается в обосновании перехода к интегрированным гибридным системам наблюдения, объединяющим радиолокационные и спутниковые технологии в единую информационную среду. Сделан вывод о том, что дальнейшее развитие радиолокационных технологий связано с их интеллектуализацией, цифровой трансформацией, внедрением алгоритмов искусственного интеллекта и формированием глобально интегрированной системы управления воздушным движением, обеспечивающей высокий уровень безопасности и эффективности авиационных операций.

Ключевые слова: Радиолокация, авиационная безопасность, управление воздушным движением, ADS-B, Mode S, радиолокационные системы, фазированные антенные решётки, мультистатистические системы, цифровизация авиации, спутниковая навигация, обработка радиолокационных сигналов, воздушное пространство

Введение

Современная гражданская авиация представляет собой высокоорганизованную динамическую систему, в которой обеспечение безопасности полётов является приоритетной задачей мирового уровня. Увеличение интенсивности воздушного движения, расширение сети международных маршрутов и рост плотности использования воздушного пространства приводят к усложнению процессов управления воздушным движением и требуют постоянного совершенствования технологий наблюдения и контроля.

Особую роль в обеспечении авиационной безопасности играют радиолокационные технологии, которые сформировались как научно-техническое направление в первой половине XX века. Исторически развитие радиолокации связано с периодом Второй мировой войны, когда в 1930–1940-х годах в Великобритании была создана первая система раннего радиолокационного обнаружения Chain Home, ставшая основой противовоздушной обороны. В этот же период аналогичные разработки активно велись в Германии, США и СССР, что ускорило формирование принципов современной радиолокации. После завершения войны радиолокационные технологии начали активно внедряться в гражданскую авиацию. Уже в 1950–1960-х годах радиолокация стала основным инструментом управления воздушным движением, обеспечивая контроль за положением воздушных судов в реальном времени. Это стало ключевым этапом перехода от визуального и навигационного контроля к централизованным системам воздушного наблюдения.

Радиолокация обеспечивает независимое определение координат, скорости и траектории движения воздушных объектов, что делает её критически важным элементом авиационной инфраструктуры безопасности. Несмотря на развитие спутниковых навигационных технологий, таких как GPS и систем автоматического зависящего наблюдения, включая ADS-B, радиолокационные системы сохраняют ключевое значение благодаря своей автономности, устойчивости к помехам и способности функционировать в условиях отсутствия спутникового сигнала.

Современная авиация представляет собой сложную динамическую систему, в которой безопасность полётов зависит от точности и надёжности средств наблюдения. С увеличением плотности воздушного движения возрастает риск конфликтных ситуаций, что требует постоянного совершенствования технологий контроля. Она обеспечивает независимое наблюдение за воздушными судами, позволяя получать информацию о их местоположении, скорости и траектории движения.

Несмотря на развитие спутниковых систем, радиолокационные технологии продолжают играть ключевую роль благодаря своей автономности и высокой надёжности. Однако современные условия требуют интеграции различных источников данных и перехода к комплексным системам наблюдения.

Цель исследования — провести всесторонний анализ современных радиолокационных средств и определить их роль в обеспечении безопасности полётов.

Методы исследования

В настоящем исследовании применён комплекс взаимодополняющих научных методов, обеспечивающих всесторонний анализ современных радиолокационных систем и их роли в обеспечении безопасности полётов гражданской авиации.

В первую очередь использован **аналитический метод**, направленный на изучение теоретических основ радиолокации, принципов формирования и обработки радиолокационных сигналов, а также выявление ключевых факторов, влияющих на точность и надёжность систем наблюдения. Данный метод позволил детально рассмотреть физические и технические особенности работы радиолокационных комплексов.

Также применён **сравнительный анализ технологий**, который использовался для сопоставления различных типов систем наблюдения — первичных радиолокаторов (PSR), вторичных радиолокаторов (SSR), включая режим Mode S, а также спутниковых технологий, таких как ADS-B. Это позволило выявить их преимущества, ограничения и области наиболее эффективного применения.

Системный подход был использован для рассмотрения радиолокации как части единой структуры управления воздушным движением. В рамках данного подхода радиолокационные системы анализировались не изолированно, а как элемент комплексной авиационной информационной среды, взаимодействующей с другими средствами навигации и контроля.

Кроме того, применялось **моделирование процессов наблюдения**, позволяющее оценить поведение радиолокационных систем в различных условиях эксплуатации, включая влияние помех, многолучевого распространения сигналов и высокой плотности воздушного движения. Это дало возможность рассмотреть потенциальные сценарии функционирования систем в реальных условиях.

Дополнительно проведён **анализ нормативных документов Международной организации гражданской авиации International Civil Aviation Organization**, включающих стандарты и рекомендации по организации воздушного движения, использованию радиолокационных и спутниковых систем наблюдения, а также требованиям к безопасности полётов.

Совокупность использованных методов обеспечила комплексность исследования, позволила выявить закономерности развития радиолокационных технологий и определить их перспективную роль в формировании современных систем управления воздушным движением.

Результаты исследования и их обсуждение

Раздел 1. Теоретические основы радиолокации

1.1. Принцип работы радиолокации

Радиолокация основана на излучении электромагнитных волн и анализе отражённых сигналов.

Основное уравнение дальности:

$$R = (c \cdot t) / 2 \quad \text{формула [1]}$$

где:

c - скорость света,

t — время распространения сигнала.

1.2. Определение скорости (эффект Доплера)

Скорость определяется по изменению частоты:

$$f_d = (2 \cdot V \cdot f) / c \quad \text{формула [2]}$$

где:

f_d — доплеровская частота,

V — скорость объекта.

1.3. Разрешающая способность и точность

Точность зависит от:

- ширины луча антенны;
- длительности импульса;
- уровня шумов.

Раздел 2. Классификация радиолокационных систем

2.1. Первичные радиолокаторы (PSR)

Используются для обнаружения любых объектов.

Преимущества:

- независимость;
- универсальность.

Недостатки:

- низкая информативность;
- влияние помех.

2.2. Вторичные радиолокаторы (SSR)

Работают с транспондерами.

Режим **Mode S** обеспечивает:

- уникальную идентификацию;
- передачу параметров полёта;
- повышение эффективности УВД.

2.3. Комбинированные системы

Комбинированные радиолокационные системы представляют собой интегрированные комплексы, объединяющие возможности первичных (PSR) и вторичных (SSR) радиолокаторов, а также современных автоматизированных средств наблюдения. Их основная задача заключается в повышении надёжности, точности и непрерывности контроля воздушного пространства за счёт использования принципа резервирования и взаимного дополнения различных технологий.

Принцип резервирования в таких системах означает, что при отказе или ограниченной эффективности одного из каналов наблюдения информация может быть получена из альтернативного источника. Например, первичный радиолокатор обеспечивает обнаружение воздушного объекта независимо от его бортового оборудования, тогда как вторичный радиолокатор предоставляет уточнённые данные о его идентификации, высоте и параметрах полёта.

Современные комбинированные системы часто дополняются технологиями автоматического зависимого наблюдения, такими как ADS-B, что позволяет формировать более полную и точную картину воздушной обстановки. При этом данные, полученные из различных источников, объединяются и обрабатываются в единой автоматизированной системе управления воздушным движением.

Дополнительным преимуществом комбинированных систем является повышение устойчивости к внешним факторам, включая радиопомехи, атмосферные условия и возможные сбои отдельных элементов инфраструктуры. За счёт дублирования каналов наблюдения снижается вероятность потери цели и повышается безопасность эшелонирования воздушных судов.

С точки зрения архитектуры, комбинированные системы представляют собой многоуровневые комплексы, включающие радиолокационные станции различного типа,

центры обработки данных и интеграционные платформы управления воздушным движением. Их функционирование соответствует требованиям международных стандартов, разработанных International Civil Aviation Organization.

Таким образом, комбинированные радиолокационные системы являются важнейшим этапом эволюции авиационного наблюдения, обеспечивая переход от отдельных технологий к единой интегрированной системе контроля воздушного пространства, ориентированной на повышение безопасности и эффективности воздушного движения.

Раздел 3. Современные технологии радиолокации

3.1. Система ADS-B

Система ADS-B обеспечивает автоматическую передачу данных о местоположении воздушного судна, формируемых на основе спутниковой навигации. Благодаря использованию сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS), координаты самолёта определяются с высокой точностью и регулярно обновляются в режиме реального времени. Помимо пространственных координат, система передаёт дополнительные параметры полёта, такие как скорость, высота, курс и идентификационный номер воздушного судна.

Высокая точность ADS-B достигается за счёт интеграции бортовых навигационных вычислителей и непрерывного обмена данными с наземными станциями и другими воздушными судами. Это позволяет формировать более полную и оперативную картину воздушной обстановки по сравнению с традиционными радиолокационными системами. Дополнительно система повышает ситуационную осведомлённость пилотов и диспетчеров, что способствует снижению риска конфликтных ситуаций в воздушном пространстве.

ADS-B особенно эффективна в регионах с ограниченным радиолокационным покрытием, включая удалённые и океанические зоны, где использование традиционных радиолокаторов затруднено или экономически нецелесообразно. Однако при всех преимуществах система имеет и ограничения, связанные с зависимостью от спутниковой навигации и потенциальной уязвимостью к подмене или искажению передаваемых данных.

В целом, ADS-B является важным элементом современной концепции наблюдения за воздушным движением и активно интегрируется в гибридные системы совместно с радиолокационными технологиями для повышения безопасности и эффективности управления воздушным пространством.

3.2. Радиолокаторы с АФАР

Радиолокаторы с активной фазированной антенной решёткой (АФАР) представляют собой современное поколение радиолокационных систем, основанных на использовании множества независимых передающих и приёмных модулей, объединённых в единую управляемую антенную структуру. В отличие от традиционных механически сканируемых радаров, АФАР позволяет осуществлять электронное управление направлением луча без физического перемещения антенны, что значительно повышает скорость и гибкость работы системы.

Основными функциональными возможностями радиолокаторов с АФАР являются:

- быстрое сканирование воздушного пространства за счёт электронного изменения направления луча, что обеспечивает практически мгновенное обновление информации о воздушной обстановке;
- одновременное сопровождение множества целей, что особенно важно при высокой плотности воздушного движения и необходимости контроля большого количества воздушных судов;
- устойчивая работа в сложных условиях, включая интенсивные помехи, неблагоприятные метеорологические явления и активное радиоэлектронное противодействие.

Дополнительным преимуществом АФАР является высокая надёжность системы. Поскольку антенна состоит из множества независимых модулей, выход из строя отдельных элементов не приводит к полной потере работоспособности радиолокатора, что обеспечивает принцип частичного резервирования.

Современные радиолокационные комплексы с АФАР активно интегрируются в системы управления воздушным движением совместно с вторичными радиолокаторами и технологиями автоматического зависящего наблюдения ADS-B, формируя единую информационную среду наблюдения за воздушным пространством. Таким образом, радиолокаторы с АФАР являются ключевым элементом развития современных систем радиолокации, обеспечивая высокую скорость обработки информации, многозадачность и устойчивость работы в условиях возрастающих требований к безопасности полётов.

3.3. Мультистатические радиолокационные системы

Мультистатические радиолокационные системы представляют собой современный тип радиолокационных комплексов, в которых передающие и приёмные элементы пространственно разнесены и могут функционировать независимо друг от друга. В отличие от традиционных моностатических радиолокаторов, где передатчик и приёмник расположены в одной точке, мультистатическая архитектура предполагает использование нескольких разнесённых приёмных и передающих узлов, формирующих единую сеть наблюдения за воздушным пространством.

Принцип работы таких систем основан на регистрации отражённого сигнала одновременно несколькими приёмными станциями, что позволяет формировать более точную и устойчивую модель положения воздушного объекта. Благодаря геометрическому разнообразию наблюдения повышается точность определения координат, особенно в условиях сложной радиолокационной обстановки.

Основными преимуществами мультистатических систем являются:

- **повышенная точность определения координат целей** за счёт многопозиционного наблюдения;
- **устойчивость к помехам и радиоэлектронному подавлению**, поскольку выход из строя одного элемента сети не приводит к полной потере наблюдения;
- **расширение зоны покрытия**, включая труднодоступные или закрытые для традиционных радаров области;
- **повышенная живучесть системы**, обусловленная распределённой архитектурой.

Кроме того, мультистатические системы позволяют более эффективно обнаруживать малозаметные и низкоэхающие объекты, что особенно важно в условиях высокой плотности воздушного движения и необходимости повышения уровня авиационной безопасности.

Недостатками таких систем являются высокая сложность проектирования и синхронизации элементов сети, значительные требования к каналам передачи данных, а также необходимость точной временной синхронизации всех узлов системы. Также внедрение мультистатической архитектуры требует развитой инфраструктуры и высокой степени цифровизации авиационных систем управления.

Мультистатические радиолокационные системы часто интегрируются с другими технологиями наблюдения, включая вторичные радиолокаторы и системы автоматического зависящего наблюдения ADS-B, формируя гибридные комплексы контроля воздушного пространства.

Таким образом, мультистатические системы являются перспективным направлением развития радиолокации, обеспечивая повышение точности, надёжности и устойчивости наблюдения в современных условиях усложнения воздушной обстановки.

3.4. Спутниковые системы наблюдения

Обеспечивают глобальное покрытие.

3.5. Интеграция с УВД и цифровизация

Современные системы:

- объединяют данные разных источников;
- используют AI для прогнозирования;
- повышают пропускную способность.

3.6. Проблемы и ограничения

Основные проблемы:

- радиопомехи;
- киберугрозы;
- высокая стоимость;
- зависимость от инфраструктуры.

3.7. Перспективы развития

Перспективы включают:

- внедрение искусственного интеллекта;
- развитие спутниковых систем;
- переход к CNS/ATM;
- создание гибридных систем.

Раздел 4. Сравнительный анализ современных радиолокационных систем: преимущества и недостатки

Современные системы наблюдения за воздушным движением включают несколько технологических направлений: первичная радиолокация (PSR), вторичная радиолокация (SSR), включая режим **Mode S**, а также спутниково-зависимые системы, такие как **ADS-B**. Их эффективность определяется точностью, надёжностью, устойчивостью к помехам и уровнем зависимости от внешних факторов.

4.1. Преимущества и недостатки PSR

Преимущества:

- полная автономность (не требует бортового оборудования);
- возможность обнаружения любых объектов (включая неидентифицированные);
- высокая надёжность в условиях отказа транспондеров.

Недостатки:

- низкая точность координат;
- отсутствие идентификационных данных;
- чувствительность к погодным условиям и отражениям от местности;
- высокая мощность излучения и энергозатраты.

Вывод: PSR остаётся критически важным резервным средством, но не обеспечивает достаточного уровня информативности для современных требований.

4.2. Сравнение по ключевым параметрам

Сравнение по ключевым параметрам в Таблице 1

Таблица 1

Критерий	PSR	SSR	ADS-B
Принцип работы	отражённый сигнал	ответ транспондера	спутниковые данные
Точность	средняя	высокая	очень высокая
Независимость	высокая	средняя	низкая
Информативность	низкая	высокая	высокая
Устойчивость к отказам	высокая	средняя	низкая
Стоимость эксплуатации	высокая	высокая	ниже

4.3. Преимущества и недостатки SSR (включая Mode S)

Преимущества:

- высокая точность определения координат;
- возможность получения дополнительной информации (высота, код самолёта);
- адресное взаимодействие в режиме **Mode S**;
- снижение радиочастотной нагрузки.

Недостатки:

- зависимость от исправности транспондера;
- возможность перегрузки каналов связи при высокой плотности движения;
- ограниченная защита от ложных сигналов.

Вывод: SSR является основным инструментом УВД, однако требует резервирования и защиты от отказов.

4.4. Преимущества и недостатки ADS-B

Преимущества:

- высокая точность позиционирования (за счёт GNSS);
- непрерывная передача данных;
- снижение нагрузки на радиолокационные станции;
- эффективен в удалённых и океанических районах.

Недостатки:

- зависимость от спутниковых систем;
- уязвимость к кибератакам (подмена координат);
- отсутствие независимого контроля (самодекларирование данных);
- необходимость глобального внедрения.

Вывод: Система **ADS-B** является перспективной, но требует дополнения радиолокационными средствами для обеспечения надёжности.

4.5. Сравнение по критериям безопасности

С точки зрения безопасности полётов:

- **PSR** — обеспечивает независимый контроль, но с низкой точностью;
- **SSR** — обеспечивает баланс точности и надёжности;
- **ADS-B** — обеспечивает максимальную точность, но минимальную защищённость.

Это показывает, что ни одна система не является универсальной.

4.6. Синергия и гибридные системы

Наиболее эффективным подходом является интеграция всех технологий:

- PSR → резервирование и обнаружение;
- SSR → основное управление;
- ADS-B → высокая точность и прогнозирование.

Такой подход соответствует концепции многоуровневой безопасности.

4.7. Экономический и эксплуатационный анализ

Экономический и эксплуатационный анализ приведен в Таблице 2

Таблице 2

Параметр	PSR	SSR	ADS-B
Стоимость внедрения	высокая	высокая	средняя
Обслуживание	сложное	среднее	простое
Масштабируемость	низкая	средняя	высокая

Вывод: ADS-B экономически выгоднее, но требует глобальной инфраструктуры.

4.8. Общий вывод сравнительного анализа

Проведённый анализ показывает, что:

- радиолокационные системы остаются основой безопасности;
- спутниковые технологии повышают точность;
- будущее принадлежит гибридным системам.

Оптимальная модель — это интеграция PSR, SSR и ADS-B в единую цифровую систему управления воздушным движением.

Раздел 5. Практическое применение радиолокационных систем в Республике Казахстан

Республика Казахстан занимает стратегически важное положение в системе международных воздушных перевозок, соединяя Европу и Азию. Через воздушное пространство страны проходят интенсивные транзитные потоки, что требует высокоэффективной системы управления воздушным движением (УВД) и надёжных средств радиолокационного наблюдения.

Ключевую роль в обеспечении безопасности полётов играет национальный провайдер аэронавигационного обслуживания — Казаэронавигация. Данная организация отвечает за эксплуатацию радиолокационных станций, внедрение современных технологий наблюдения и интеграцию систем УВД.

5.1. Структура радиолокационного контроля

На территории Казахстана используется комбинированная система наблюдения, включающая:

- первичные радиолокаторы (PSR);
- вторичные радиолокаторы (SSR), включая режим **Mode S**;
- системы автоматического зависимого наблюдения **ADS-B**.

Основные радиолокационные узлы сосредоточены в районах крупнейших аэропортов, включая:

- Международный аэропорт Нурсултан Назарбаев
- Международный аэропорт Алматы

Эти узлы обеспечивают контроль воздушного движения на наиболее загруженных направлениях.

5.2. Внедрение современных технологий

В последние годы в Казахстане активно внедряются современные системы наблюдения:

1. Использование Mode S Позволяет:

- точно идентифицировать воздушные суда;
- уменьшить нагрузку на радиоканалы;
- повысить эффективность диспетчерского управления.

2. Развитие ADS-B Система ADS-B применяется:

- в удалённых регионах (степные и малонаселённые зоны);
- для повышения точности позиционирования;
- как дополнение к радиолокационным системам.

3. Цифровизация УВД Внедрение автоматизированных систем позволяет:

- прогнозировать траектории движения;
- предотвращать конфликтные ситуации;
- снижать нагрузку на диспетчеров.

5.3. Преимущества существующей системы в Казахстане

- выгодное географическое положение для транзитных полётов;
- комбинированное использование PSR, SSR и ADS-B;
- постепенная модернизация инфраструктуры;

– соответствие международным стандартам International Civil Aviation Organization.

5.4. Проблемы и ограничения

Несмотря на развитие, существуют определённые трудности:

Большая территория страны Требуется значительных затрат на покрытие радиолокационными системами.

Наличие удалённых регионов В некоторых зонах отсутствует плотное радиолокационное покрытие.

Зависимость от импортных технологий Большинство оборудования поставляется зарубежными производителями.

Кибербезопасность Внедрение цифровых систем увеличивает риски информационных угроз.

5.5. Перспективы развития в Казахстане

Дальнейшее развитие радиолокационных систем в Казахстане связано с:

- расширением сети ADS-B;
- модернизацией радиолокационных станций;
- внедрением элементов искусственного интеллекта;
- переходом к концепции CNS/ATM;
- интеграцией с международными системами наблюдения.

Особое значение имеет развитие транзитного потенциала страны, что требует повышения пропускной способности воздушного пространства.

Заключение

Практическое применение радиолокационных систем в Казахстане демонстрирует эффективное сочетание традиционных и современных технологий наблюдения. Несмотря на существующие ограничения, страна активно развивает инфраструктуру УВД, ориентируясь на международные стандарты и цифровизацию. В перспективе Казахстан имеет потенциал стать одним из ключевых авиационных хабов региона за счёт модернизации систем радиолокации и управления воздушным движением.

Проведённый в рамках работы комплексный анализ современных радиолокационных систем показал, что они продолжают оставаться ключевым элементом обеспечения безопасности полётов гражданской авиации, несмотря на активное развитие спутниковых и цифровых технологий наблюдения. Радиолокация обеспечивает непрерывный контроль воздушного пространства, позволяя оперативно получать информацию о координатах, скорости и траектории движения воздушных судов, что является критически важным для предотвращения конфликтных ситуаций и поддержания безопасной организации воздушного движения.

Современные тенденции развития радиолокационных технологий направлены на повышение точности измерений, увеличение надёжности функционирования систем и расширение их интеграции с цифровыми платформами управления воздушным движением. Особое значение приобретает внедрение вторичных радиолокационных систем, включая режим Mode S, а также использование автоматического зависимого наблюдения ADS-B, что позволяет формировать более полную и точную картину воздушной обстановки.

Анализ показал, что наибольшую эффективность в современных условиях демонстрируют гибридные системы наблюдения, объединяющие радиолокационные и спутниковые технологии. Такой подход обеспечивает резервирование каналов получения информации, повышает устойчивость к сбоям и внешним воздействиям, а также способствует оптимизации процессов управления воздушным движением.

Перспективы развития авиационной радиолокации связаны с дальнейшей цифровизацией, внедрением интеллектуальных алгоритмов обработки данных и

использованием технологий искусственного интеллекта для прогнозирования воздушной обстановки. Это позволит повысить уровень автоматизации диспетчерских систем и снизить влияние человеческого фактора.

Таким образом, радиолокационные системы сохраняют стратегическую значимость в авиации и будут оставаться основой безопасности полётов, эволюционируя в направлении интегрированных, интеллектуальных и глобально связанных систем наблюдения воздушного пространства.

Список использованных источников

1. Сколник М. И. Радиолокационные системы: основы и применение. – М.: Техносфера, 2007. – 536 с.
2. Сколник М. И. Введение в радиолокационные системы. – М.: Радио и связь, 2000. – 672 с.
3. Ричардс М. А., Ширер Дж. А., Холм У. А. Основы современной радиолокации. – М.: Техносфера, 2014. – 942 с.
4. Махафа Б. Р. Анализ и проектирование радиолокационных систем с использованием MATLAB. – М.: ДМК Пресс, 2015. – 752 с.
5. Международная организация гражданской авиации. Приложение 10 к Конвенции о международной гражданской авиации: авиационная электросвязь. – Монреаль: ICAO, 2022.
6. Международная организация гражданской авиации. Руководство по системам передачи данных обслуживания воздушного движения (Doc 9694). – Монреаль: ICAO, 2021.
7. EUROCONTROL. Система наблюдения ADS-B: внедрение и применение в управлении воздушным движением. – Брюссель, 2020.
8. EUROCONTROL. Система наблюдения Mode S: принципы и применение. – Брюссель, 2019.
9. EUROCONTROL. Системы наблюдения в управлении воздушным движением: технический отчёт. – Брюссель, 2022.
10. НАСА. Перспективные системы управления воздушным движением нового поколения. – Вашингтон, 2020.

УДК 621.396.96

В.В.Лохматов

Военный институт Сил Воздушной обороны имени Т.Ж. Бигелдинова

Республика Казахстан, город Актобе

Loxmatov@mail.ru

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЛИНЗОВОГО ОТРАЖАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ 3D-ПЕЧАТИ

Андатпа: Мақалада X-диапазонда 9 ГГц орталық жиілікте жұмыс істеуге арналған және PETG филаментінен FDM қабаттап балқыта басып шығару әдісімен дайындалатын Люнеберг линзалық ретрорефлекторының есептік-технологиялық нұсқасы қарастырылған. Жұмыстың өзектілігі градиенттік диэлектриктерді қалыптастырудың күрделі дәстүрлі технологияларын қолданбай, қолжетімді пассивті радиолокациялық шағылдырғыштар мен эксперименттік СВЧ-құрылымдарды жасау қажеттілігімен айқындалады. Люнеберг линзасының диэлектрлік өтімділігін радиус бойынша өзгерту заңы центрлік сфералық қабықшалардағы полимермен жергілікті толтыру пайызын өзгерту арқылы жуықтап іске асырылуы мүмкін екені көрсетілген. Есептік диаметрі 250 мм болатын құрылым үшін негізгі геометриялық және электродинамикалық параметрлер, толқын ұзындығы, құрылымның электрлік өлшемі, өлшеудің минималды алыс аймағы, сондай-ақ радиалдық қабаттардың саны мен қалыңдығы анықталған. 15 қабықшаға есептелген тиімді диэлектрлік өтімділіктің сатылы профилі келтіріліп, прототип дайындауға қажетті PETG толтыруының бастапқы мәндері ұсынылған. Ретрорефлектордың конструкциялық орындалуына, модельді сегменттерге бөлу тәсілін таңдауға, шағылдырушы бөлікті металдандыру талаптарына, бекіту элементтерінің әсерін азайтуға және FDM-басып шығарудың технологиялық ерекшеліктеріне ерекше назар аударылған. Толтыру түрін, ішкі ұяшық өлшемін, периметрлер санын, қабат биіктігін таңдау, филаментті кептіру және бұйымның нақты массасын бақылау бойынша ұсынымдар қарастырылған. Есептік параметрлер түпкілікті болып табылмайтыны атап өтілген, себебі PETG тиімді диэлектрлік өтімділігі өндірушіге, ылғалдылыққа, бояғышқа, жолақтардың бағытына, басып шығару режиміне және нақты ішкі геометрияға тәуелді. Сондықтан сипаттамаларды нақтылау үшін калибрлеу үлгілерін дайындауды, ϵ_{eff} және $\tan\delta$ өлшеуді, қабаттар кестесін түзетуді, электродинамикалық модельдеуді және прототиптің натурлық радиолокациялық сынақтарын қамтитын эксперименттік тексеру әдістемесі ұсынылған. Алынған нәтижелер тәжірибелік үлгіні одан әрі жобалау, слайсерге арналған басқарушы модельді дайындау, басып шығару параметрлерін таңдау және өлшеу стендін ұйымдастыру үшін негіз ретінде пайдаланылуы мүмкін. Зерттеудің практикалық маңыздылығы кең таралған PETG материалын сантиметрлік диапазондағы арзан радиолокациялық ретрорефлекторларды, оқу макеттерін және калибрлеу объектілерін жасауға қолдану мүмкіндігін негіздеумен сипатталады. Ұсынылған тәсіл конструкцияны кейіннен басқа өлшемдерге, материалдарға және жиілік диапазондарына бейімдеуге бағытталған.

Түйін сөздер: Люнеберг линзасы, шағылдырғыш, ретрорефлектор, 9 ГГц, X-диапазон, филамент, PETG, 3D-басып шығару, FDM, градиенттік диэлектрлік құрылым, радиолокациялық қима.

Abstract: The article considers a calculation and technological variant of a Luneburg lens retroreflector designed to operate at a center frequency of 9 GHz in the X-band and intended for fabrication by the FDM fused deposition modeling method using PETG filament. The relevance of the work is determined by the need to create affordable passive radar reflectors and experimental microwave structures that can be manufactured without using complex conventional technologies for forming gradient dielectrics. It is shown that the required radial law of variation of the dielectric

permittivity of a Luneburg lens can be approximately implemented by changing the local polymer infill percentage in concentric spherical shells. For a calculated diameter of 250 mm, the main geometric and electrodynamic parameters, wavelength, electrical size of the structure, minimum far-field measurement distance, as well as the number and thickness of radial layers are determined. A stepped profile of the effective dielectric permittivity calculated for 15 shells is presented, and initial PETG infill values required for prototyping are proposed. Particular attention is paid to the structural design of the retroreflector, the choice of a method for dividing the model into segments, the requirements for metallizing the reflective part, reducing the influence of fastening elements, and the technological features of FDM printing. Recommendations are considered for selecting the infill type, internal cell size, number of perimeters, layer height, filament drying, and control of the actual mass of the product. It is noted that the calculated parameters are not final, since the effective dielectric permittivity of PETG depends on the manufacturer, humidity, colorant, raster orientation, printing mode, and actual internal geometry. Therefore, to refine the characteristics, an experimental verification method is proposed, including the fabrication of calibration samples, measurement of ϵ_{eff} and $\tan\delta$, correction of the layer table, electrodynamic modeling, and full-scale radar testing of the prototype. The obtained results can be used as a basis for further design of an experimental sample, preparation of a slicer control model, selection of printing parameters, and organization of a measurement stand. The practical significance of the study lies in substantiating the possibility of using common PETG to create low-cost radar retroreflectors, training models, and calibration objects for the centimeter-wave range. The proposed approach is aimed at the subsequent adaptation of the structure to other sizes, materials, and frequency ranges.

Keywords: Luneburg lens, lens reflector, retroreflector, 9 GHz, X-band, PETG, 3D printing, FDM/FFF, gradient-index dielectric structure, radar cross section, effective permittivity.

Аннотация: В статье рассмотрен расчётно-технологический вариант линзового отражателя (ретрорефлектора) Люнеберга, предназначенного для работы на центральной частоте 9 ГГц в X-диапазоне и изготовления методом послойного наплавления FDM из филамента PETG. Актуальность работы обусловлена необходимостью создания доступных пассивных радиолокационных отражателей и экспериментальных СВЧ-структур, которые могут изготавливаться без применения сложных традиционных технологий формирования градиентных диэлектриков. Показано, что требуемый радиальный закон изменения диэлектрической проницаемости линзы Люнеберга может быть приближённо реализован за счёт изменения локального процента заполнения полимером в концентрических сферических оболочках. Для расчётного диаметра 250 мм определены основные геометрические и электродинамические параметры, длина волны, электрический размер конструкции, минимальная дальняя зона измерений, а также количество и толщина радиальных слоёв. Приведён ступенчатый профиль эффективной диэлектрической проницаемости, рассчитанный для 15 оболочек, и предложены стартовые значения заполнения PETG, необходимые для прототипирования. Особое внимание уделено конструктивному исполнению ретрорефлектора, выбору способа разделения модели на сегменты, требованиям к металлизации отражающей части, снижению влияния крепёжных элементов и технологическим особенностям FDM-печати. Рассмотрены рекомендации по выбору типа заполнения, размера внутренней ячейки, количества периметров, высоты слоя, сушке филамента и контролю фактической массы изделия. Отмечено, что расчётные параметры не являются окончательными, поскольку эффективная диэлектрическая проницаемость PETG зависит от производителя, влажности, красителя, ориентации дорожек, режима печати и реальной внутренней геометрии. Поэтому для уточнения характеристик предложена методика экспериментальной проверки, включающая изготовление калибровочных образцов, измерение ϵ_{eff} и $\tan\delta$, корректировку таблицы слоёв, электродинамическое моделирование и натурные радиолокационные испытания

прототипа. Полученные результаты могут использоваться как основа для дальнейшего проектирования опытного образца, подготовки управляющей модели для слайсера, выбора параметров печати и организации измерительного стенда. Практическая значимость исследования заключается в обосновании возможности применения, распространённого PETG для создания недорогих радиолокационных ретрорефлекторов, учебных макетов и калибровочных объектов сантиметрового диапазона. Предложенный подход ориентирован на последующую адаптацию конструкции под другие размеры, материалы и частотные диапазоны.

Ключевые слова: Линза Люнеберга, отражатель, ретрорефлектор, 9 ГГц, X-диапазон, филамент, PETG, 3D-печать, FDM, градиентная диэлектрическая структура, радиолокационное сечение.

Введение

Линза Люнеберга относится к классу градиентно-диэлектрических устройств, в которых показатель преломления изменяется по радиусу. В классическом случае сферическая линза фокусирует падающую плоскую электромагнитную волну в точку на противоположной поверхности сферы. Если в зоне фокуса расположить проводящий отражающий слой, устройство работает как линзовый отражатель (ретрорефлектор): падающая волна фокусируется на металлизированной поверхности, отражается и после обратного прохождения через линзу переизлучается преимущественно в направлении источника облучения [2, 5, 7].

Для диапазона 9 ГГц такая конструкция представляет интерес как пассивный радиолокационный отражатель и как экспериментальный объект для оценки возможностей 3D-печати в области СВЧ-диэлектрических структур. В отличие от металлического уголкового отражателя, линзовый отражатель (ретрорефлектор) обеспечивает более широкую рабочую угловую область и может быть интегрирован в обтекаемый корпус. Основная технологическая трудность заключается в реализации непрерывного радиального распределения диэлектрической проницаемости. При FDM-печати оно заменяется ступенчатой аппроксимацией: линза разбивается на набор оболочек с различным процентом заполнения [1, 4, 6].

В качестве материала для опытного образца выбран филамент PETG, поскольку он хорошо печатается на распространённых FDM-принтерах, имеет более высокую теплостойкость и ударную вязкость по сравнению с PLA, а по опубликованным данным обладает умеренной диэлектрической проницаемостью и сравнительно низкими потерями в СВЧ- и миллиметровом диапазонах. Для проектирования обязательно требуется калибровка конкретной партии филамента, так как диэлектрические параметры зависят от производителя, красителя, влажности, фактического заполнения, ориентации дорожек и режима печати [3, 8].

Проблема исследования заключается в необходимости разработки технологически доступного способа изготовления линзового отражателя (ретрорефлектора) Люнеберга для диапазона 9 ГГц с использованием FDM 3D-печати из филамента PETG. Основная сложность состоит в реализации радиального градиента эффективной диэлектрической проницаемости, необходимого для работы линзы Люнеберга. При использовании FDM-печати данный градиент может быть приближённо сформирован за счёт изменения процента заполнения в концентрических оболочках, однако фактические электродинамические свойства такой структуры зависят от параметров печати, типа заполнения, свойств филамента и качества сборки. Поэтому требуется расчёт профиля диэлектрической проницаемости, разработка послойной структуры линзы, определение стартовых параметров заполнения PETG и последующая экспериментальная проверка полученного прототипа.

Метод исследования

В работе использован комплексный расчётно-экспериментальный метод исследования, включающий анализ научно-технической литературы по линзам Люнеберга, градиентным диэлектрическим структурам и технологиям 3D-печати СВЧ-элементов. Теоретическая часть исследования основана на применении математической модели радиального распределения показателя преломления и эффективной диэлектрической проницаемости линзы Люнеберга. Для адаптации непрерывного профиля диэлектрической проницаемости к условиям FDM-печати применён метод дискретизации, при котором сферическая линза представляется в виде набора концентрических радиальных оболочек с различным процентом заполнения PETG.

Дополнительно использованы инженерно-расчётный метод для определения геометрических, электродинамических и технологических параметров линзового отражателя; сравнительный анализ свойств PETG как материала для СВЧ-диэлектрических структур; метод табличного представления расчётных данных; а также метод экспериментальной верификации, предусматривающий изготовление калибровочных образцов, измерение эффективной диэлектрической проницаемости, проверку геометрии, массы и проведение радиолокационных испытаний опытного образца. Такой подход позволяет оценить возможность изготовления линзового ретрорефлектора Люнеберга методом 3D-печати и уточнить его характеристики по результатам практических измерений.

Результаты исследования и их обсуждение

Раздел 1. Принцип действия линзового ретрорефлектора

Классическая линза Люнеберга представляет собой сферическую градиентную структуру, в которой электромагнитная волна плавно изменяет направление распространения за счёт неоднородного показателя преломления.

В идеальном случае относительная диэлектрическая проницаемость изменяется от максимального значения в центре линзы до значения, близкого к единицы на внешней поверхности.

Профиль линзы задается выражением:

$$n(r) = \sqrt{2 - \left(\frac{r}{R}\right)^2}, \quad \varepsilon_r(r) = 2 - \left(\frac{r}{R}\right)^2, \quad (1)$$

где: $n(r)$ – показатели преломления в точке с радиусом r ;

$\varepsilon_r(r)$ – относительная диэлектрическая проницаемость;

R – радиус линзы;

r – расстояние от центра линзы.

Для обычного плотного PETG значение ε_r выше требуемого центрального уровня, поэтому практически используется не сплошная печать, а регулируемая пористая структура: воздух внутри ячеек понижает эффективную диэлектрическую проницаемость слоя [1, 4, 6].

Ретрорефлекторный режим достигается за счёт металлизации части поверхности линзы. Для моностатической радиолокационной схемы, когда передатчик и приёмник пространственно совмещены, задняя металлизированная область возвращает энергию в сторону источника. На практике применяют металлический колпак, фольгу, напыление, токопроводящее покрытие или тонкий металлический экран, повторяющий форму задней поверхности линзы [2, 5, 7].

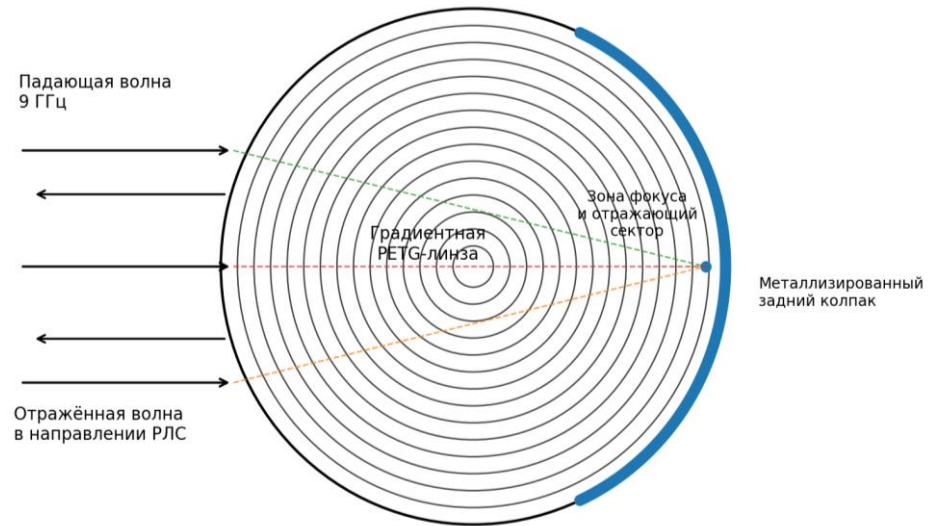


Рисунок 1. Схема действия линзового ретрорефлектора Люнеберга

Раздел 2. Расчётные исходные данные для варианта 9 ГГц

В качестве базового опытного варианта принят диаметр линзы 250 мм. При центральной частоте 9 ГГц длина волны в свободном пространстве составляет приблизительно 33,3 мм. Следовательно, диаметр линзы равен примерно $7,5\lambda$, что достаточно для демонстрации выраженного линзового эффекта и получения заметного радиолокационного отклика при сохранении возможности изготовления на крупноформатном или среднеформатном FDM-принтере.

Таблица 1

Исходные параметры расчётного варианта линзового ретрорефлектора

Параметр	Значение
Центральная частота	$f_0 = 9 \text{ ГГц}$
Длина волны в свободном пространстве	$\lambda_0 \approx 33.3 \text{ мм}$
Расчётный диаметр линзы	$D = 250 \text{ мм}$
Радиус линзы	$R = 125 \text{ мм}$
Электрический размер	$D/\lambda_0 \approx 7,5$
Количество радиальных оболочек	$N = 15$
Средняя толщина одной оболочки	$\Delta r \approx 8.33 \text{ мм}$
Материал печати	PETG
Расчётное ε_r PETG при 100% заполнении	$\varepsilon_{\text{PETG}} \approx 2,35$
Отражающий элемент	металлизированный колпак/сектор
Минимальная дальняя зона для измерения	$R_{ff} \geq 2D^2/\lambda \approx 3.8 \text{ м}$

Раздел 3. Дискретизация профиля диэлектрической проницаемости

При изготовлении на FDM-принтере непрерывное распределение $\varepsilon_r(r)$ заменяется набором концентрических сферических оболочек. Среднее значение диэлектрической проницаемости i -й оболочки целесообразно рассчитывать, как объёмное среднее по сферическому слою:

$$\varepsilon_r i = 2 - \left(\frac{3}{5} \right) \cdot \left(\frac{xi^5 - xi - 1^5}{xi^3 - xi - 1^3} \right), \quad xi = \frac{ri}{R} \quad (2)$$

Для перехода от требуемой эффективной диэлектрической проницаемости к проценту заполнения можно использовать первичную линейную оценку:

$$pi \approx 100 \cdot \frac{(\varepsilon_r i - 1)}{(\varepsilon_{PETG} - 1)} \quad (3)$$

где pi - объёмная доля PETG в процентах. Эта формула используется как начальное приближение для настройки слайсера. В реальной печати фактическое значение pi отличается от заданного из-за периметров, верхних и нижних слоёв, перекрытия дорожек, усадки и анизотропии. Поэтому перед изготовлением всей линзы необходимо напечатать набор калибровочных образцов PETG с разным заполнением и измерить их эффективную ε_r [1, 3, 8].

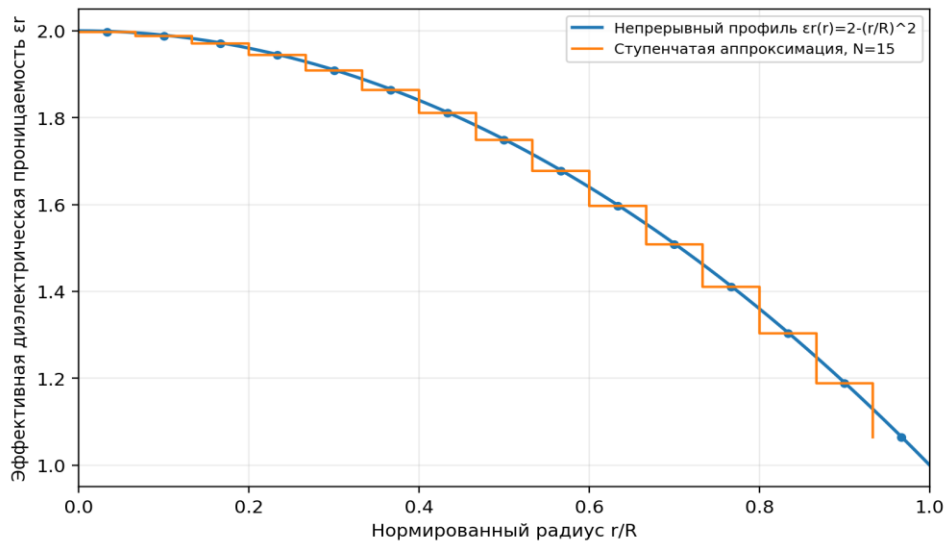


Рисунок 2. Непрерывный и ступенчатый профиль эффективной ε_r для 15 радиальных оболочек

В таблице 2 приведён расчётный профиль для диаметра 250 мм и 15 радиальных оболочек. Значения заполнения следует рассматривать как стартовые для прототипирования, а не как окончательные технологические параметры.

Таблица 2

Расчётная послойная структура линзы Лüneберга $D = 250$ мм для PETG

№ слоя	Диапазон r , мм	r/R	ε_r слоя	PETG infill, %
1	0.0–8.3	0.000–0.067	1.997	74
2	8.3–16.7	0.067–0.133	1.988	73
3	16.7–25.0	0.133–0.200	1.970	72
4	25.0–33.3	0.200–0.267	1.944	70
5	33.3–41.7	0.267–0.333	1.908	67
6	41.7–50.0	0.333–0.400	1.864	64
7	50.0–58.3	0.400–0.467	1.810	60
8	58.3–66.7	0.467–0.533	1.748	55
9	66.7–75.0	0.533–0.600	1.677	50
10	75.0–83.3	0.600–0.667	1.597	44
11	83.3–91.7	0.667–0.733	1.508	38
12	91.7–100.0	0.733–0.800	1.410	30
13	100.0–108.3	0.800–0.867	1.304	22
14	108.3–116.7	0.867–0.933	1.188	14
15	116.7–125.0	0.933–1.000	1.064	5

Примечание. Для внешних слоёв получаются малые значения заполнения. Если слайсер или механическая прочность не позволяют уверенно печатать 5-7% заполнения, допускается технологически поднять минимальное заполнение до 8-12%, но такой шаг необходимо учитывать в электродинамической модели, поскольку внешний слой станет более «плотным», чем требуется идеальным законом Лüneберга.

Раздел 4. Конструктивное исполнение

Конструктивно ретрорефлектор рекомендуется выполнять в виде сферической или близкой к сферической сборки, разделённой на печатные сегменты. Для FDM-печати целесообразно не печатать всю сферу монолитом, а разделить её на полусферы или секторные элементы. Это уменьшает объём поддержек, повышает стабильность геометрии и позволяет контролировать заполнение каждого радиального слоя.

Возможны два практических подхода. Первый - печать концентрических сферических оболочек с последующей сборкой. Такой вариант удобен для контроля каждого слоя, но требует точной посадки оболочек и усложняет сборку. Второй - печать линзы как единого тела или крупных сегментов, где зоны с разным заполнением задаются модификаторами в слайсере. Этот вариант проще технологически, однако требует аккуратной настройки переходов между зонами и проверки, что слайсер не добавляет лишние сплошные стенки между областями.

Металлизированный отражатель располагается на задней части линзы относительно направления основного облучения. Для опытного образца можно использовать алюминиевую или медную фольгу, тонкий листовой металл, токопроводящую ленту либо напыление. Важны непрерывность проводящего слоя, плотное прилегание к поверхности и отсутствие больших зазоров. Толщина металлического слоя на 9 ГГц может быть небольшой, но он должен быть именно проводящим; обычный «металлический» или угленаполненный пластик не всегда обеспечивает достаточную отражающую способность.

Для механической фиксации линзы на платформе или в испытательном стенде желательно предусмотреть лёгкое диэлектрическое крепление, расположенное вне основной апертуры. Металлические винты, кронштейны и стойки вблизи рабочей поверхности могут исказить диаграмму рассеяния и должны учитываться при моделировании и измерениях.

Раздел 5. Технологические рекомендации по 3D-печати PETG

Филамент PETG чувствителен к влажности, поэтому перед печатью желательно просушить. Влага ухудшает качество дорожек, вызывает вспенивание, микропоры и нестабильность эффективной диэлектрической проницаемости. Для СВЧ-структур это критично, поскольку электродинамические свойства зависят не только от материала, но и от фактической внутренней геометрии.

Для диапазона 9 ГГц характерный размер внутренней ячейки заполнения должен быть существенно меньше длины волны в материале. Практически для FDM-печати рационально использовать размер ячейки порядка 3-6 мм, а ширину линии и высоту слоя подбирать так, чтобы структура была повторяемой. В качестве первого варианта можно рассматривать gyroid, cubic или grid, но выбранный тип заполнения нужно использовать одинаково во всех калибровочных образцах и в линзе.

Рекомендуемые стартовые параметры печати: сопло 0,4-0,6 мм; высота слоя 0,20-0,28мм; 2 периметра для механической устойчивости; минимальное количество верхних и нижних сплошных слоёв внутри функциональных зон; температура сопла и стола - по паспорту конкретного PETG; обдув умеренный, чтобы не ухудшать межслойную адгезию. Для участков, где требуется низкая ϵ_r , следует избегать автоматического добавления лишних стенок и сплошных перемычек.

Если линза печатается сегментами, места склейки должны быть тонкими и повторяемыми. Избыточный клей, герметик или толстые соединительные швы создают локальные неоднородности. Для опытного образца желательно заранее напечатать малые фрагменты стыков и измерить их влияние на массу, геометрию и прохождение СВЧ-сигнала.

Таблица 3

Стартовые технологические рекомендации для печати PETG-линзы

Параметр	Рекомендация
Материал	PETG одной партии, предварительно высушенный
Заполнение	переменное по радиусу согласно таблице 2
Тип infill	gyroid/cubic/grid после калибровки
Размер внутренней ячейки	ориентировочно 3-6 мм
Периметры	минимально достаточные, обычно 2
Верх/низ в функциональных зонах	по возможности 0-1, без лишних сплошных мембран
Разделение модели	полусферы или секторные элементы
Контроль	масса сегмента, фактическое заполнение, размеры, калибровка ϵ_r

Раздел 6. Оценка массы и ожидаемых характеристик

Для выбранного диаметра 250 мм полный геометрический объем сферы составляет около 8181 см³. При расчётном профиле заполнения средняя объёмная доля PETG составляет около 29.6%, что даёт ориентировочную массу полимерной части порядка 3.1 кг без учёта дополнительных периметров, клея, крепления и металлического отражателя. Реальная масса, как правило, будет больше расчётной и может достигать 3,5-4,5 кг в зависимости от настроек слайсера.

Электромагнитная эффективность ретрорефлектора зависит от диаметра линзы, точности реализации профиля ϵ_r , потерь филамента PETG, качества металлизации, угла падения, поляризации и наличия крепёжных элементов. Для инженерной оценки можно считать, что линза диаметром около 7,5λ способна обеспечить выраженное увеличение обратного рассеяния по сравнению с простой диэлектрической сферой. Однако конкретное значение ЭПР должно определяться расчётом в CST/HFSS/FEKO или аналогичной программе и подтверждаться измерением [2, 5, 7].

Наиболее вероятные источники снижения эффективности: завышенная ϵ_r внешних слоёв из-за периметров, анизотропия заполнения, неоднородность швов между сегментами, воздушные зазоры, шероховатость и неполная электропроводность отражающего покрытия, а также несовпадение фактической частоты оптимальной работы с расчётными 9 ГГц.

Раздел 7. Методика экспериментальной проверки

Проверку целесообразно проводить в три этапа. Первый этап - измерение диэлектрических параметров PETG-образцов с разным процентом заполнения. Для этого печатаются плоские или волноводные образцы с тем же типом заполнения, направлением печати, высотой слоя и числом периметров, которые будут использованы в линзе. По результатам измерений строится зависимость $\epsilon_{eff}(p)$, после чего таблица слоёв корректируется [8].

Второй этап - проверка геометрии и массы. Каждый сегмент или оболочка взвешивается; фактическая масса сравнивается с расчётной. Сильное расхождение указывает, что слайсер сформировал иной объём пластика, чем предполагалось. После

сборки контролируются диаметр, сферичность, качество стыков и прилегание металлизированной поверхности.

Третий этап - радиолокационные измерения. Для частоты 9 ГГц минимальная дальняя зона для линзы диаметром 250 мм оценивается как $R \geq 2D^2/\lambda \approx 3,8$ м. Поэтому измерительный стенд желательно располагать на дистанции не менее 4-5 м. В качестве опорного объекта можно использовать металлическую сферу или угловой отражатель с известным радиолокационным сечением. Измерение выполняется при нескольких углах поворота линзы и двух взаимно ортогональных поляризациях.

Для получения достоверных результатов необходимо исключить паразитные отражения от пола, штативов, кабелей и стен. При наличии векторного анализатора цепей рекомендуется применять временное окно (time gating). Дополнительно полезно выполнить частотный прогон в полосе 8-10 ГГц, чтобы оценить, насколько реальная конструкция согласуется с расчётной центральной частотой 9 ГГц.

Заключение

Линзовый ретрорефлектор Люнеберга под частоту 9 ГГц может быть изготовлен методом FDM-печати из филамента PETG при условии, что градиентная диэлектрическая структура реализуется не сплошным материалом, а регулируемым объёмным заполнением. Для выбранного диаметра 250 мм рационально использовать 12-15 радиальных оболочек; в данной работе приведён вариант с 15 слоями, обеспечивающий достаточно плавную ступенчатую аппроксимацию профиля $\epsilon_r(r)$.

Главное преимущество филамента PETG заключается в технологической доступности, механической устойчивости и пригодности для прототипирования СВЧ-диэлектрических элементов. Основное ограничение - необходимость экспериментального уточнения зависимости эффективной проницаемости от заполнения, так как паспортные данные филамента и расчётные формулы не учитывают всех особенностей конкретной печати.

Для дальнейшей разработки рекомендуется: изготовить калибровочные образцы PETG с заполнением 5-80%; измерить ϵ_{eff} вблизи 9 ГГц; скорректировать таблицу слоёв; выполнить электродинамическое моделирование линзы с фактическими параметрами; напечатать сегментный опытный образец; провести измерение диаграммы обратного рассеяния и сравнить её с моделью.

Список использованных источников

1. Grigoriev I., Munina I., Zelenchuk D. 3D printed Ku band cylindrical Luneburg lens // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2015. 012095. DOI: 10.1088/1742-6596/2015/1/012095.
2. Bahr R. A., Adeyeye A., Tentzeris M. M. 3D-Printed Omnidirectional Luneburg Lens Retroreflectors for Low-Cost mm-Wave Positioning // 2020 IEEE International Conference on RFID. 2020. DOI: 10.1109/RFID49298.2020.9244891.
3. Proyavin M. D., Sobolev D. I., Parshin V. V., Belousov V. I., Mishakin S. V., Glyavin M. Y. Study of 3D-Printed Dielectric Barrier Windows for Microwave Applications // Electronics. 2021. Vol. 10, No. 18. 2225. DOI: 10.3390/electronics10182225.
4. Bordas F., Belsola A., Sabouroux P. Additive Manufacturing of a Luneburg Lens for Electromagnetic Applications // Progress In Electromagnetics Research M. 2026. Vol. 137. P. 34–44. DOI: 10.2528/PIERM25071507.
5. Kaděra P. et al. Wide-Angle Ceramic Retroreflective Luneburg Lens Based on quasi-Conformal Transformation Optics for Mm-Wave Indoor Localization // IEEE Access. 2022. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3166509.

6. Munina I., Grigoriev I., O'Donnell G., Trimble D. A review of 3D printed gradient refractive index lens antennas // IEEE Access. 2023. Vol. 11. P. 8790–8809. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3239782.

7. Jiao X.-H., Wan G., Fu B. A novel retroreflective planar Luneburg lens for the radar cross section enhancement // International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering. 2022. Vol. 32, No. 11. DOI: 10.1002/mmce.23352.

8. Baker-Jarvis J. R., Janezic M. D., Grosvenor J. H., Geyer R. G. Transmission/reflection and short-circuit line methods for measuring permittivity and permeability. NIST Technical Note 1355. National Institute of Standards and Technology, 1992.

УДК 621.65:629.7

И.С.Бакниязов

Республиканское государственное учреждение войсковая часть 54835,

Республика Казахстан, город Семей

Bakniyazov.iliyas.mag@yandex.ru

АНАЛИЗ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО НАСОСА НШ-39 И МЕТОДОВ ИХ ДИАГНОСТИКИ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Аннотация: Насос НШ-39 в открытых источниках представлен не одной унифицированной гражданской модификацией, а как семейство шестерённых насосов; наиболее полно документирован открытый вариант НШ-39М, описываемый как одноступенчатый шестерённый насос высокого давления. Для этой модификации приводятся рабочее давление 45...65 кгс/см², максимальное 90 кгс/см² и подача 30 л/мин при 2500 об/мин и 65 кгс/см². Общая конструктивная логика семейства НШ и современных внешних шестерённых насосов того же класса совпадает: корпус, ведущая и ведомая шестерни, торцовые поджимные элементы, опоры/втулки, уплотнения, всасывающий и нагнетательный каналы. Это позволяет строить диагностическую модель НШ-39 как модели внешнего шестерённого насоса, но с обязательной калибровкой под конкретный заводской паспорт. Наиболее значимые механизмы отказа для такого насоса — износ торцовых и радиальных зазоров, рост внутренних утечек, повреждение уплотнений, подсос воздуха на всасывании, кавитация, загрязнение и обводнение рабочей жидкости, а также вторичный перегрев из-за утечек и трения. Официальные и отраслевые руководства прямо связывают снижение подачи, пенообразование, шум, утечки и нагрев с падением уровня жидкости, повреждением манжет, загрязнением, недостаточным подпором на входе и дефектами распределительной аппаратуры системы. Для внешних шестерённых насосов загрязнение жидкости рассматривается как один из главных факторов преждевременного износа. Для эксплуатационной диагностики НШ-39 наилучшей представляется многоуровневая архитектура: базовый контур контроля давления, подачи и температуры; контур вибрационного мониторинга корпуса; контур анализа масла и чистоты жидкости; визуальный контроль утечек; при необходимости — акустическая эмиссия, динамика пульсаций давления и онлайн-мониторинг загрязнения масла. Важный вывод обзоров и авиационных исследований по condition monitoring гидронасосов состоит в том, что давление и температура полезны как интегральные показатели состояния, но обычно недостаточны для раннего выявления зарождающихся дефектов; поэтому для ранней диагностики нужны вибрация, гидроакустика и параметры жидкости. Для положительно вытесняющих насосов абсолютные вибрационные пороги лучше задавать относительно исправного эталона, поскольку стандарт ISO 10816-7 для динамических насосов прямо исключает вращающиеся насосы положительного вытеснения из области применения.

Ключевые слова: Гидравлический насос НШ-39, шестерённый насос, диагностика, техническое состояние, вибрационный контроль, кавитация, внутренние утечки, анализ масла.

Введение

Актуальность темы определяется тем, что гидронасос является источником энергии гидросистемы, а его деградация сначала проявляется не катастрофическим отказом, а ухудшением подачи, ростом пульсаций, шумом, нагревом и загрязнением рабочей жидкости. Для эксплуатационных систем это означает не только ремонт самого насоса, но и ускоренный износ гидрораспределителей, гидроцилиндров, фильтров и трубопроводной арматуры. Русскоязычные обзоры по вибродиагностике гидрооборудования также подчёркивают, что переход от реактивного ремонта к раннему диагностированию особенно

важен именно в производственной эксплуатации, где отказ одной гидромашины способен вызвать непропорционально большие потери.

Цель исследования — сформировать аналитическую и методическую основу для статьи о неисправностях НШ-39 и системе их диагностики в полевых условиях и на лабораторных стендах. Объект исследования — гидравлический насос НШ-39 как внешний шестерённый насос и связанные с ним эксплуатационные режимы. Предмет исследования — диагностические признаки, измерительные каналы, алгоритмы обработки и критерии принятия решения по техническому состоянию.

Задачи исследования состоят в следующем:

во-первых, систематизировать конструктивные особенности НШ-39 и типовые механизмы отказа;

во-вторых, сопоставить традиционные и современные методы диагностики по информативности и применимости в эксплуатации;

в-третьих, предложить требования к испытательной установке, полю измерений, протоколу эксперимента и цифровой обработке данных;

в-четвёртых, сформировать набор диагностических признаков и критериев, пригодных для внедрения в реальную систему мониторинга.

Так как точная модификация насоса требует уточнения, в исследовании приняты два допущения. Первое: под НШ-39 понимается внешний шестерённый насос той же конструктивной логики, что НШ и НШ-39М. Второе: если для исследуемой модификации паспортные значения давления, частоты вращения, подачи, вязкости и рабочей жидкости отличаются, окончательные пороги должны быть перенесены на значения именно вашего паспорта. Для НШ-39М открытый учебно-эксплуатационный источник приводит рабочие параметры 45...65 кгс/см², максимум 90 кгс/см² и 30 л/мин при 2500 об/мин; для семейства НШ официальный заводской документ по насосам НШ той же архитектуры описывает принцип действия, состав и критерии отказа/предельного состояния [1].

Конструкция НШ-39 и спектр отказов

Для открыто документированной модификации НШ-39М насос выполнен в литом корпусе из алюминиевого сплава и содержит ведущее и ведомое зубчатые колёса, подвижные и неподвижные бронзовые диски, игольчатые подшипники, уплотнения, штуцера всасывания и нагнетания; уменьшение утечки через торцовые зазоры обеспечивается поджимом бронзовых дисков давлением рабочей жидкости.

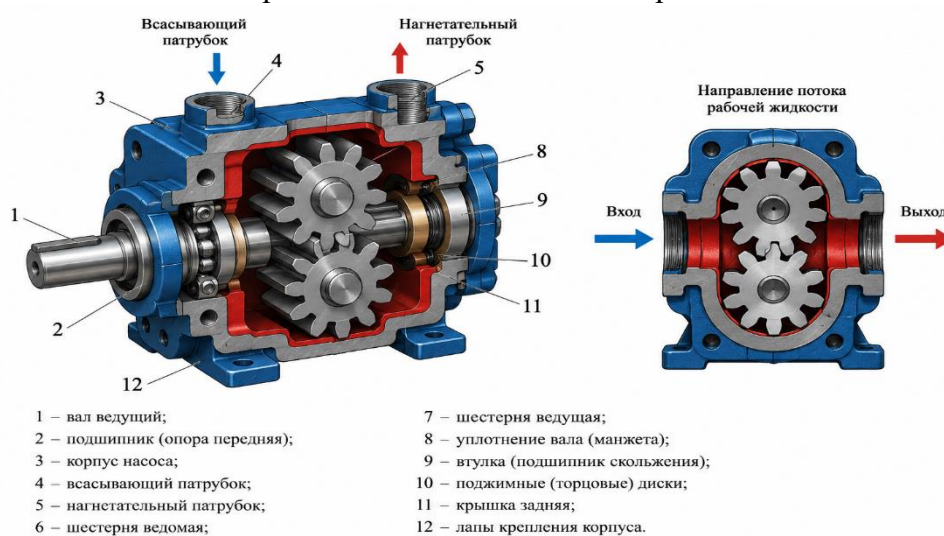


Рисунок 1 Конструктивная схема шестеренного насоса НШ-39

В официальном руководстве по насосам НШ того же семейства эта же логика описана через корпус, ведущий и ведомый роторы, опорные втулки, манжеты и гидравлический поджим втулок к торцам роторов.

Из этой конструкции непосредственно следуют наиболее чувствительные к деградации зоны: торцы шестерён и поджимных дисков, радиальные зазоры между вершинами зубьев и корпусом, опоры/втулки, уплотнение вала, присоединения всасывающей линии и каналы подвода/отвода жидкости. Исследования износа внешних шестерённых насосов показывают, что основными зонами wear являются торцевые поверхности шестерён и боковых пластин, области радиального зазора зуб — корпус и рабочие поверхности зубьев; увеличение зазоров ведёт к росту внутренних утечек и снижению объёмной эффективности. В accelerated wear tests деградация подачи и объёмной эффективности растёт по мере увеличения зазоров, причём радиальный износ часто оказывает более сильное влияние на потерю подачи, чем торцевой [2].

Для целей диагностики отказы удобно разделить на пять классов. Первый класс — механические отказы: износ зубьев, торцов, втулок, подшипников, перекос вала, повреждение шлицев, трещины корпуса или крышки. Второй класс — гидравлические отказы: внутренние утечки, потеря способности наращивать давление, рост пульсаций и снижение объёмной эффективности. Третий класс — кавитация и аэрация: недостаточный подпор на входе, подсос воздуха, пенообразование, пузырьки в потоке, эрозионное повреждение. Четвёртый класс — внешние утечки: манжеты, О-кольца, стык корпуса и крышки, штуцерные соединения. Пятый класс — деградация рабочей жидкости: рост загрязнённости частицами, вода, изменение вязкости, кислотности и износных металлов, вызывающие вторичный ускоренный износ насоса и всей системы.

Официальное руководство по насосам НШ прямо указывает ряд эксплуатационных симптомов: отсутствие требуемого давления при низком уровне жидкости или протекании через уплотнение ведущего ротора; выбивание пены из горловины бака при подсосе воздуха через манжеты и уплотнения всасывающей линии; протекание через стык корпуса и крышки; нагрев насоса и бака; шум при работе при низком уровне жидкости. Тот же документ фиксирует критически важный для статьи количественный критерий: предельным состоянием насоса считается снижение подачи более чем на 20 % от номинального значения из-за износа базовых деталей [3]. Для инженерной диагностики это один из самых ценных официальных порогов.

Метод исследования и диагностическая архитектура

Рациональная система диагностики НШ-39 должна строиться как иерархия каналов: сперва — дешёвые и надёжные интегральные измерения давления, подачи, температуры и визуального состояния; далее — вибрация и динамика пульсаций; затем — анализ масла, акустика и, если требуется, онлайн-мониторинг с алгоритмами распознавания состояний. Такой подход соответствует обзорам condition monitoring гидронасосов: давление и температура «видят» уже развившийся defect, вибрация наиболее универсальна, акустические методы особенно чувствительны к ранней кавитации, а анализ жидкости показывает загрязнение, воду и металл износа как физические следы деградации.

Сравнение сведено по данным обзоров condition monitoring, руководств производителей внешних шестерённых насосов, материалов по fluid analysis и стандартов по НК. Для НШ-39 наиболее рационально сочетание каналов давления/подачи, вибрации и анализа масла; именно эта тройка даёт наилучший баланс чувствительности, устойчивости и стоимости.

Минимально достаточная экспериментальная установка для статьи должна включать: датчик давления на всасывании у входного фланца; датчик давления на нагнетании сразу за насосом; расходомер в напорной линии; температурные датчики в баке, на всасывании, на нагнетании и на корпусе насоса; тахометр или энкодер; как минимум два акселерометра

на корпусе насоса — в радиальном и осевом направлении; точку отбора пробы масла; при расширенной конфигурации — датчик частиц/воды онлайн и АЕ-датчик у зоны всасывания или крышки.

Таблица 1

Сравнительная характеристика методов диагностики НШ-39

Метод	Что фиксирует	Преимущества	Ограничения	Рекомендуемая роль
Контроль давления и подачи	Потерю объёмной эффективности, внутренние утечки, неспособность развить давление	Простота, высокая эксплуатационная пригодность, официальный критерий по подаче	Низкая чувствительность к ранним дефектам	Обязательный базовый контур
Контроль температуры	Перегрев из-за утечек, трения, неправильной вязкости, недостатка жидкости	Дёшево, легко автоматизируется	Низкая специфичность; симптом поздней стадии	Контур предупреждения
Вибрационный контроль	Износ опор, зубьев, перекос, кавитацию, рост пульсаций	Наиболее универсальный канал; возможна диагностика без остановки	Требует фильтрации и привязки к режиму	Основной диагностический канал раннего обнаружения
Акустика и акустическая эмиссия	Зарождение кавитации, импульсные явления	Ранняя чувствительность к пузырьковым процессам	Сложность шумоподавления и монтажа	Дополнительный канал для кавитации
Анализ масла	Частицы, вода, вязкость, TAN, wear metals	Видит причину деградации, а не только её следствие	Дискретность отбора проб, лабораторная дисциплина	Обязателен для подтверждения причины
Визуальный осмотр и НК	Внешние течи, трещины, нарушение крепежа, пену, следы перегрева	Быстро и дёшево	Не выявляет ранний внутренний износ	Скрининг и подтверждение
Онлайн-мониторинг	Непрерывные тренды частиц, воды, качества масла, давления, вибрации	Позволяет строить прогноз и раннее предупреждение	Более высокая стоимость и интеграционная сложность	Для критичных объектов и пилотных проектов

Вибрационные обзоры для гидрооборудования и pump-cavitation studies рекомендуют располагать датчики в нескольких плоскостях и максимально близко к зоне

источника сигнала, а авиационные работы по condition monitoring дополнительно указывают на полезность каналов pressure, fluid temperature, drive shaft speed, vibration/structure-borne noise, flow rate и hydraulic fluid pollution.

Предлагаемые частоты дискретизации для исследования таковы: для медленных трендов температуры, установившегося давления и расхода — 10–100 Гц; для переходных режимов давления и расхода — 200–1000 Гц; для пульсаций давления — 2–10 кГц; для вибрации корпуса — не ниже 25,6 кГц; для акустической эмиссии — 250–500 кГц; для частоты вращения — либо импульс 1/rev для синхронизации, либо энкодер 60–360 имп./об, если планируется order tracking [4]. Это не универсальный стандарт НШ-39, а обоснованный исследовательский диапазон: кавитационные и импульсные признаки проявляются в низко-, средне- и высокочастотных областях, АЕ-сигналы имеют существенно более высокий частотный диапазон, а вибрационный канал должен уверенно захватывать частоту зацепления и её боковые полосы.

Таблица 2

План проведения экспериментальных исследований насоса НШ-39

Этап	Режим	Цель	Регистрируемые каналы	Повторы
Исправный эталон	$n = 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ пном; $p = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ рном	Построение базы нормального состояния	$R_{вх}$, $R_{вых}$, Q , T , n , вибрация, масло	не менее 3
Переходные процессы	Пуск, выход на режим, сброс/набор нагрузки	Оценка кратковременных признаков и кавитации при недоподпоре	P , Q , T , вибрация, пузырьки/пена	не менее 5 циклов
Лабораторные дефекты	Подсос воздуха, частичное дросселирование всасывания, контролируемая загрязнённость, изношенный/дефектный экземпляр	Формирование библиотеки признаков	Полный набор каналов + АЕ по возможности	не менее 3
Полевое подтверждение	Реальные эксплуатационные режимы	Проверка устойчивости признаков к шумам и нагрузочным вариациям	$R_{вых}$, Q , T , n , вибрация, масло, визуальный контроль	длительный тренд
Контроль после обкатки / серий измерений	То же	Выявление изменения чистоты и wear metals	Масляная проба, ISO 4406, вода, вязкость, TAN, спектрометрия	по регламенту

Для стенда и полевых испытаний нужно отдельно выдержать требования к всасывающему тракту. В руководстве Bosch Rexroth для внешних gear units указано, что резервуар должен быть достаточно объёмным, линии всасывания — короткими и правильно размещёнными, а отрицательное давление на входе не должно падать ниже 0,7 bar abs; по близкому по классу руководству Parker для внешних gear pumps вакуум на входе

обычно не должен превышать 5 inHg, иначе возрастает риск кавитации [5]. Поэтому в методике следует использовать короткую всасывающую линию увеличенного диаметра, минимизировать местные сопротивления и отдельно регистрировать подпор на входе насоса.

План эксперимента целесообразно строить как комбинацию стендовых и полевых данных. На стенде создают контролируемую матрицу режимов и дефектов; в поле проверяют устойчивость признаков к реальным внешним помехам. Такая логика соответствует работам по CM of hydraulic pumps, где подчёркивается необходимость совмещать bench data и in-service data, а также использовать здоровый эталон и повторяемые режимы.

Здесь $p_{ном}$ и $r_{ном}$ следует брать из паспорта исследуемой модификации; если в статье используется НШ-39М авиационного исполнения, открытый источник даёт ориентир 2500 об/мин и рабочий диапазон 45...65 кгс/см². Общие правила измерений и стендовых испытаний логично опираться на ГОСТ 17108 и ГОСТ 14658.

Методика обработки данных должна быть многоступенчатой. Сначала — синхронизация каналов по времени и частоте вращения, удаление тренда, антиалиас-фильтрация и нормировка на режим работы. Затем — спектральный анализ FFT, time-frequency analysis для нестационарных участков, wavelet/wavelet packet decomposition для импульсных и early-fault признаков, а также вычисление статистических признаков: RMS, variance, crest factor, kurtosis, skewness, spectral entropy, band energy, sideband ratio. Для каналов масла — анализ ISO 4406, water ppm/free water, viscosity, TAN и wear metals; для решения задачи классификации — табличные модели на этих признаках. Обзоры fault diagnosis по hydraulic pumps и публикации по external gear pumps показывают, что wavelet-признаки и multi-source fusion обычно информативнее «сырых» time- or frequency-domain features, особенно на ранних стадиях.

С точки зрения выбора модели принятия решения на первом этапе внедрения рационален не «чистый deep learning», а комбинация rule-based логики и лёгкого ML. Причина проста: для эксплуатационных насосов данные часто малочисленны, разрежены по режимам и чувствительны к внешним влияниям. Поэтому для статьи рекомендован двухконтурный подход:

контур А — инженерные правила по давлению, подаче, температуре, пене, чистоте жидкости и утечкам;

контур Б — ML-классификатор по признакам вибрации, пульсаций давления и масла.

Если объём размеченных данных ограничен, предпочтительны SVM, Random Forest, градиентный бустинг или PNN; при накоплении данных можно переходить к CNN/1D-CNN и к mechanism-data fusion. Этот выбор является инженерным выводом из обзоров и работ по hydraulic pump fault diagnosis: wavelet + SVM/MLP для external gear pump дают высокую точность, а hybrid and mechanism-data fusion лучше переносятся из лаборатории в эксплуатацию [6].

Результаты и обсуждения

Главный ожидаемый результат исследования состоит в том, что для НШ-39 наиболее устойчивыми диагностическими индикаторами будут не отдельные показатели, а их сочетания: снижение подачи при фиксированных оборотах и нагрузке; рост амплитуды вибрации корпуса и изменение спектральной структуры; изменение пульсаций давления; ухудшение чистоты масла; появление воды и wear metals; рост температуры; визуальные признаки пены и внешней течи. Для шестерённого насоса потеря подачи — наиболее прямой интегральный индикатор износа; для ранней стадии более чувствительными ожидаются вибрационные и масляные признаки [7].

Таблица 3

Ожидаемые диагностические признаки неисправностей насоса НШ-39

Признак	Вероятная неисправность	Порог / критерий
Снижение подачи при тех же n и p	Износ торцов, рост радиальных зазоров, внутренние утечки	Официальный критерий семейства НШ: падение подачи более чем на 20 % от номинала — предельное состояние
Невозможность развить требуемое давление	Низкий уровень жидкости, подсос воздуха, износ, утечка через уплотнение	Не выдерживается паспортное давление при штатном режиме; оценивать относительно рпаспорт
Пена в баке, пузырьки на сливе, «сухой» шум	Подсос воздуха, аэрация, кавитация	Любое устойчивое появление пены/пузырьков при исправном уровне жидкости — тревожный критерий
Рост загрязнённости жидкости	Загрязнение частицами, ускоренный износ пар трения	Для внешних gear units: не хуже ISO 4406 20/18/15; ухудшение на 1–2 кода относительно baseline — предупреждение
Обнаружение free water / рост water ppm	Обводнение, риск кавитации и ускоренного износа	Наличие свободной воды — аварийный признак; ppm-вода оценивается по тренду и типу масла
Рост температуры корпуса/масла при том же режиме	Трение, внутренние утечки, неправильная вязкость, перегрузка	Исследовательский критерий: +10...15 °C к эталону на том же режиме — предупреждение
Рост вибрации в полосе зацепления и боковых полос	Износ зубьев, втулок, опор, перекося, ослабление крепления	Исследовательский критерий: прирост band energy/RMS не менее 25 % или >6 dB к baseline
Рост широкополосной высокочастотной вибрации или АЕ-всплесков	Кавитация, пузырьковая эрозия, аэрация	Относительный критерий; калибруется по healthy baseline и режиму
Изменение структуры пульсаций давления	Кавитация, гидравлическая неравномерность, нарушение всасывания, износ	Рост broadband составляющей и усиление высокочастотного хвоста относительно baseline
Внешняя течь по манжете, стыку крышки, штуцерам	Разрушение уплотнений, ослабление крепежа	Факт устойчивой внешней течи — признак дефекта, не допускающий игнорирования

В таблице сведены и официальные, и исследовательские критерии. Официально подтверждённым порогом для семейства НШ является падение подачи более чем на 20 % от номинала. Критерии по чистоте жидкости для внешних gear units опираются на ISO 4406 20/18/15 из руководства Bosch Rexroth [8]. Критерии по пене, пузырькам, течам и шуму напрямую следуют из официального руководства по насосам НШ и инструкций производителей gear pumps. Вибрационные и pressure-ripple thresholds в таблице приведены как предлагаемые исследовательские пороги, которые необходимо откалибровать на

исправном эталоне, поскольку dedicated standard for rotodynamic pumps не распространяется на positive displacement pumps.

Для интерпретации результатов полезно различать три базовых диагностических сценария.

Первый сценарий — износ и внутренние утечки: при неизменных оборотах насос постепенно теряет подачу, объёмная эффективность снижается, температура растёт, а в масле могут появляться продукты износа. Вибрация при этом растёт умеренно, но устойчиво; наиболее показательны тренды, а не разовый максимум.

Второй сценарий — кавитация и аэрация: подпор на входе ухудшается, система становится шумнее, появляются пузырьки, растёт широкополосная высокочастотная составляющая вибросигнала, меняется структура pressure pulsation, а в тяжёлых случаях развивается эрозионное повреждение рабочих поверхностей. По обзорам pump cavitation detection именно акустические и vibro-acoustic сигналы наиболее чувствительны к ранним стадиям, причём процесс может проявляться как в низко-, так и в высокочастотной области, а не только в одном «узком» диапазоне.

Третий сценарий — загрязнение и деградация жидкости: сначала ухудшается класс чистоты, затем растут wear metals, изменяются вязкость и кислотность, возможна вода. Механически это ведёт к разрыву смазочной плёнки, ускоренному износу торцов и втулок, местным задирам, заеданию золотников и вторичному нагреву гидросистемы. На практике этот сценарий особенно опасен тем, что разрушает не только насос, но и downstream components. Поэтому для статьи целесообразно трактовать анализ масла не как вспомогательную, а как причинно-диагностическую подсистему [9].

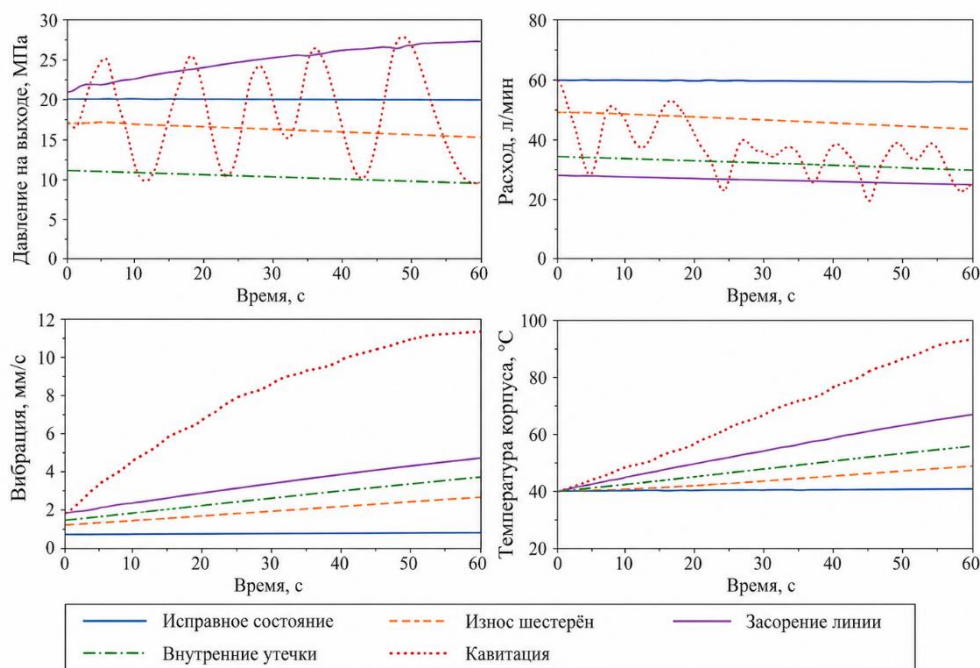


Рисунок 2 Характер изменения диагностических параметров при различных состояниях насоса НШ-39

Ожидаемо наиболее информативный компактный набор признаков для классификации состояния НШ-39 будет включать: относительное снижение подачи; давление нагнетания под нагрузкой; динамическую составляющую давления; RMS и kurtosis вибросигнала в 2–4 целевых полосах; отношение энергии полосы зацепления к широкополосной энергии; температуру корпуса; ISO-code чистоты жидкости; water ppm / free water; суммарный показатель wear metals. Именно такой многоканальный набор лучше

всего подходит для SVM/Random Forest на старте и для hybrid mechanism-data fusion по мере накопления данных [10].

Заключение

Главное ограничение исследования — неполная определённости исходной модификации. Без точного паспорта нельзя жёстко установить окончательные значения пном, рном, Qном, предельной вязкости, рабочей жидкости и допустимых кратковременных перегрузок. Второе ограничение связано с переносом лабораторных признаков в эксплуатацию: обзоры по hydraulic pump condition monitoring показывают, что алгоритм, хорошо работающий на стенде, может терять устойчивость в реальной среде из-за внешних влияний и изменчивости режимов. Третье ограничение — нормативное: стандарты для rotodynamic pump vibration не предназначены для rotating positive displacement pumps, поэтому без собственного baseline абсолютные пороги могут привести к ошибочным решениям.

С практической точки зрения внедрение системы диагностики НШ-39 в эксплуатации целесообразно делать поэтапно. На первом этапе — healthy baseline для исправного насоса, регламент отбора проб масла и базовый набор датчиков P-Q-T-vibration. На втором — библиотека характерных дефектов на стенде и обучение feature-based classifier. На третьем — пилот на реальной машине с относительными, а не абсолютными порогами. На четвёртом — переход к непрерывному онлайн-мониторингу частиц/воды и гибридной модели механика + данные. Такой путь лучше согласуется с выводами о необходимости bench data, in-service data и hybrid CM architecture.

Список использованных источников

1. Киселев Д.Ю. Общие сведения и конструкция гидравлической системы и системы управления вертолетом Ми-8: учебное пособие. Самара: СГАУ, 2015.
2. Руководство по эксплуатации насосов НШ. Н42.892.00.000 РЭ. URL: <https://promnasosy39.ru/images/zagruzki/sobemnye/sshesterennye/snasosy-nsh/nsh.pdf>
3. Condition Monitoring for Hydraulic Pumps. RWTH Aachen University. URL: <https://publications.rwth-aachen.de/record/726211/files/726211.pdf>
4. Вибродиагностика технического состояния гидрооборудования // Вестник ПНИПУ. Механика.
5. Stryczek J., Bednarczyk S., Biernacki K. Wear degradation in hydraulic external gear pumps. Sensors. 2020. Vol. 20, No. 14. Article 4058.
6. Bosch Rexroth. External gear units: Operating instructions. RE 07012-B/2020-11-18.
7. Cavitation detection based on different signals in pumps: review. Processes. 2023. Vol. 11, No. 7. Article 2007.
8. Current status and applications for hydraulic pump fault diagnosis. Sensors. 2022. Vol. 22, No. 24. Article 9714.
9. Parker Hannifin. Gear Pump Service Manual. HY13-PMD300-SM_US.
10. ISO 4413: Hydraulic fluid power — General rules and safety requirements for systems and their components.

ҚАРУ-ЖАРАҚ ПЕН ӘСКЕРИ ТЕХНИКА

УДК 656.7

М.К.Танатов, И.И.Ермейчук

*Т.Ж.Бигелдинов атындағы Әуе қорғанысы күштерінің Әскери институты,
Қазақстан Республикасы, Ақтөбе қаласы
mtanatov5@gmail.com*

ПЕРСПЕКТИВАЛЫ ҰШҚЫШСЫЗ ҰШУ АППАРАТТАРЫ

Андатпа: Ұсынылған жұмыста пилотсыз ұшу аппараттары бар перспективалы кешендерді (ҰҰА кешендері) дамыту бағыттары мен жауынгерлік қолдануға ретроперспективті және әскери-техникалық талдау жүргізілген. Тарихи тұрғыда ҰҰА-ның Қырғы-қабақ соғыс кезеңіндегі қарапайым қашықтықтан басқарылатын нысаналар мен автоматты барлаушы ұшақтардан бастап, ХХІ ғасырдың басындағы көпфункционалды барлау-соққы беру жүйелеріне дейінгі трансформациялану кезеңдері зерттелді. Қазіргі заманғы қару қалыптасуының тәжірибесі негізінде қарсыластың жоғары қарқынды радиоэлектрондық және отты қарсы әрекеті жағдайында пилотсыз платформаларды жаңғырту үрдістері қаралды. Байланыс арналары мен спутниктік навигация сигналдары басылған кезде іс-қимылдардың автономдығын қамтамасыз ету үшін басқару контурына жасанды интеллект алгоритмдерін интеграциялау мәселесіне ерекше назар аударылған. ҰҰА кешендерінің өміршеңдігін арттыру және олардың көрінуін төмендету бойынша техникалық шешімдер талданады. Тактикалық және жедел-тактикалық буындардағы отандық пилотсыз кешендердің тактикалық-техникалық сипаттамаларын жетілдіру бойынша ұсынымдар тұжырымдалған. Соғыстан кейінгі кезеңдегі техника мен технологияның қарқынды дамуы және жергілікті соғыстардың нақты жағдайында ұшқышсыз ұшу аппараттарын пайдалану тәжірибесі сапалы жаңа деңгейде ұшқышсыз жүйелерді құрудың алғышарты болды. Шағын көлемді борттық басқару және деректерді беру жүйелерін, арнайы аппаратураларды әзірлеу және өнеркәсіптік шығару пилотсыз ұшу аппараттарын пайдалану салалары мен мүмкіндіктерін едәуір кеңейтті. Сонымен, Ливандағы Сирия-Израиль қақтығысы кезінде 1982 жылдың жазында ұшқышсыз ұшу аппараттарының жаңа класы алғаш рет дебют жасады. Олар артиллериялық, зымырандық немесе авиациялық соққылар жасау мүддесі үшін нақты уақыт ауқымында ақпарат беретін жеке нысандар мен нысандарды алдын ала барлау үшін пайдаланылған израильдік Scout және Mastiff әзірлеген ұшқышсыз ұшу аппараттары болды. Өз кезегінде Сирия тарапы Ливанда алғаш рет кеңестік ұшқышсыз "Рейс" барлау кешенін қолданды. Ол әсіресе таулы жерлерде қолданылған кезде өзін жақсы дәлелдеді. Scout және Mastiff барлау ұшақтарын сәтті қолдану КСРО Қарулы Күштерінің басшылығын "Строй" бағдарламасы бойынша жаңа буын ұшқышсыз ұшақтарын құруға қойылатын талаптарды әзірлеуге итермеледі. Әуе барлау-әскери барлаудың құрамдас бөлігі, авиация күштерінің операцияларды (жауынгерлік іс-қимылдарды) дайындау және табысты жүргізу үшін қажетті жау, объектілер, жер, ауа-райы, әуе және жердегі радиациялық және химиялық жағдай туралы деректерді өндіру жөніндегі іс-шаралар жиынтығы.

Түйінді сөздер: ҰҰА – ұшқышсыз ұшу аппараты, ӘК – әуе кемелері, ҚМ – қорғаныс министрлігі, РЭБ – радиоэлектрондық күрес, ИҚ – инфрақызыл, АЖ – авиациялық жабдығы, АЗҚ – авиациялық зақымдау құралдары, АТ – авиациялық техника, АЭ – авиациялық эскадрилья, ЖІҚ – жауынгерлік іс-қимылдар, ӘӘК – әскери әуе күштері, ҚҚ – қарулы қақтығыс, ҰОС – Ұлы Отан соғысы, ЖЖМ – жаңар-жағармай материалдары, ИАКЕ – инженерлік-авиациялық қамтамасыз ету, ИАҚ – инженерлік-авиациялық қызмет, ИТҚ – инженерлік-техникалық құрам, БАЗ – басқарылмайтын авиациялық зымыран, ЖФАБ – Жарықшақты-фугасты авиациялық бомба, АҚҚ – ауа қысымының қабылдағышы, ИАКЕК – Инженерлік-авиациялық қамтамасыз ету қағадилары, ИАКЕБП - Инженерлік-авиациялық

қамтамасыз етуді басқару пункті, РЭЖ – радиоэлектрондық жабдығы, ЖҚЖҚҚҚ – жалпы қолданыстағы жердегі қызмет көрсету құралдары, АҚЖҚҚҚ – арнайы қолданыстағы жердегі қызмет көрсету құралдары, ТПБ – техникалық-пайдалану бөлімі, ЭЕМ – электрондық-есептеуіш машина.

Annotation: This paper provides a retrospective and military-technical analysis of the development trends and combat employment of prospective unmanned aircraft systems (UAS). In the historical context, the study examines the evolutionary stages of UAS, ranging from the simplest remotely piloted target drones and automated reconnaissance and strike systems of the early 21st century. Based on the experience of modern armed conflicts, the paper investigates the modernization trends of unmanned platforms operating under conditions of high-intensity electronic warfare and enemy fire counteraction. Special attention is paid to the integration of artificial intelligence algorithms into the control loop to ensure autonomous operations in environments where communication links and satellite navigation signals are suppressed. Technical solutions aimed at enhancing UAS survivability and reducing their signatures are analyzed. The paper formulates recommendations for improving the tactical and technical characteristics of domestic tactical and operational-tactical unmanned systems. In the post-war period, the rapid development of equipment and technology, combined with the experience of operating unmanned aircraft system in actual local conflicts, became a prerequisite for creating unmanned systems at a qualitatively new level. The development and industrial production of small-sized onboard control and data transmission systems, along with specialized equipment, significantly expanded the application areas and capabilities of unmanned aircraft systems. Thus, in the summer of 1982, during the Syrian-Israeli conflict in Lebanon, a new class of unmanned aircraft systems made its debut for the first time. These were the Israeli-developed Scout and Mastiff UASs, which were utilized for preliminary reconnaissance of individual sites and targets, providing real-time data to support artillery, missile, or airstrikes. For its part, the Syrian side utilized the Soviet «Reys» unmanned reconnaissance system in Lebanon for the first time. It provided itself highly effective, especially when deployed in mountainous terrain. The successful employment of the Scout and Mastiff reconnaissance aircraft prompted the leadership of the USSR Armed Forces to develop requirement for creating a new generation of UASs under the «Stroy» program. Aerial reconnaissance is an integral component of military intelligence; it comprises a set of measures executed by aviation forces to acquire data on the enemy, targets, terrain, weather, as well as CBRN (chemical, biological, radiological, and nuclear) conditions in the air and on the ground, which are essential for the preparation and successful conduct of military operations (combat actions).

Keywords: UAS – unmanned aircraft system, AC – aircraft, MOD – ministry of defense, EW – electronic warfare, IR – infrared, AE – aviation equipment, ALW – Air-launched weapons, AT – aviation technology, AS – aviation squadron, H – hostilities, AF – air force, AC – armed conflict, GPW – The Great Patriotic War, F&L – Fuels and lubricants, EAS – engineering and aviation service, ETP – engineering and technical personnel, UAR – unguided aircraft rocket, HEFB – High-Explosive Fragmentation Bomb, APP – air pressure probe, EASR – engineering and aviation support regulations, EASCP – engineering and aviation support control point, REE – radio-electronic equipment, CPGSE – common purpose ground support equipment, SPGSE – specialized purpose ground support equipment, FMS – field maintenance squadron, EC – electronic computer.

Аннотация: В представленной работе проведен военно-технический анализ направлений развития и боевого применения перспективных комплексов с беспилотными летательными аппаратами. В историческом контексте исследованы этапы трансформации БПЛА от простейших дистанционно управляемых мишеней Холодной войны до современных много функциональных разведовательно-ударных систем начала XXI века.

На основе опыта современных вооруженных конфликтов исследованы тенденции модернизации беспилотных платформ в условиях высокоинтенсивного радиоэлектронного и огневого противодействия противника. Особое внимание уделено интеграции алгоритмов искусственного интеллекта в контур управления для обеспечения автономности действий при подавлении каналов связи и сигналов спутниковой навигации. Сформулированы рекомендации по совершенствованию тактико-технических характеристик отечественных беспилотных комплексов тактического и оперативно-тактического звеньев. В послевоенный период стремительное развитие техники и технологий, а также опыт применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в условиях локальных войн стали предпосылкой для создания беспилотных систем на качественно новом уровне. Разработка и промышленный выпуск малогабаритных бортовых систем управления и передачи данных, а также специальной аппаратуры значительно расширили сферы применения и возможности беспилотных летательных аппаратов. Так, летом 1982 года во время сирийско-израильского конфликта в Ливане впервые дебютировал новый класс беспилотных летательных аппаратов. Это были разработанные Израилем БПЛА Scout и Mastiff, которые использовались для предварительной разведки отдельных объектов и целей, передавая информацию в режиме реального времени в интересах нанесения артиллерийских, ракетных или авиационных ударов. В свою очередь, сирийская сторона в Ливане впервые применила советский беспилотный разведывательный комплекс «Рейс». Он хорошо зарекомендовал себя, особенно при использовании в горной местности. Успешное применение разведывательных самолетов Scout и Mastiff побудило руководство Вооруженных Сил СССР разработать требования к созданию беспилотных летательных аппаратов нового поколения по программе «Строй». Воздушная разведка – составная часть военной разведки; комплекс мероприятий, осуществляемых силами авиации для добывания данных о противнике, объектах, местности, погоде, а также о радиационной и химической обстановке в воздухе и на земле, необходимых для подготовки и успешного ведения операций (боевых действий).

Ключевые слова: БПЛА – беспилотный летательный аппарат, ВС – воздушные суда, МО – министерство обороны, РЭБ – радиоэлектронная борьба, ИК – инфракрасный, АО – авиационное оборудование, АСП – авиационное средство поражения, АТ – авиационная техника, АЭ – авиационная эскадрилья, БД – боевые действия, ВВС – военно-воздушные силы, ВК – вооруженный конфликт, ВОВ – Великая Отечественная война, ГСМ – горючее и смазочные материалы, ИАО – инженерно-авиационное обеспечение, ИАС – инженерно-авиационная служба, ИТС – инженерно-технический состав, НАР – неуправляемая авиационная ракета, ОФАБ – осколочно-фугасная авиационная бомба, ПВД – приемник воздушного давления, ПИАО – Правила инженерно – авиационного обеспечения, ПУ ИАО – пункт управления инженерно-авиационного обеспечения, РЭО – радиоэлектронное оборудование, СНО ОП – средства наземного обслуживания общего применения, СНО СП – средства наземного обслуживания специального применения, ТЭЧ – технико-эксплуатационная часть, ЭВМ – электронно-вычислительная машина.

Кіріспе

Соғыстан кейінгі кезеңдегі техника мен технологияның қарқынды дамуы және жергілікті соғыстардың нақты жағдайында ұшқышсыз ұшу аппараттарын пайдалану тәжірибесі сапалы жаңа деңгейде ұшқышсыз жүйелерді құрудың алғышарты болды. Шағын көлемді борттық басқару және деректерді беру жүйелерін, арнайы аппараттарды әзірлеу және өнеркәсіптік шығару пилотсыз ұшу аппараттарын пайдалану салалары мен мүмкіндіктерін едәуір кеңейтті.

Сонымен, Ливандағы Сирия-Израиль қақтығысы кезінде 1982 жылдың жазында ұшқышсыз ұшу аппараттарының жаңа класы алғаш рет дебют жасады. Олар артиллериялық, зымырандық немесе авиациялық соққылар жасау мүддесі үшін нақты

уақыт ауқымында ақпарат беретін жеке нысандар мен нысандарды алдын ала барлау үшін пайдаланылған израильдік Scout және Mastiff әзірлеген ұшқышсыз ұшу аппараттары болды.

Өз кезегінде Сирия тарапы Ливанда алғаш рет кеңестік ұшқышсыз "Рейс" барлау кешенін қолданды. Ол әсіресе таулы жерлерде қолданылған кезде өзін жақсы дәлелдеді. Scout және Mastiff барлау ұшақтарын сәтті қолдану КСРО Қарулы Күштерінің басшылығын "Строй" бағдарламасы бойынша жаңа буын ұшқышсыз ұшақтарын құруға қойылатын талаптарды әзірлеуге итермеледі.

Әуе барлау-әскери барлаудың құрамдас бөлігі, авиация күштерінің операцияларды (жауынгерлік іс-қимылдарды) дайындау және табысты жүргізу үшін қажетті жау, объектілер, жер, ауа-райы, әуе және жердегі радиациялық және химиялық жағдай туралы деректерді өндіру жөніндегі іс-шаралар жиынтығы.

Пилотсыз ұшу аппараттары деп орындалатын тапсырмаға сәйкес уақыт ішінде жер атмосферасында немесе одан тыс жерлерде нақты тапсырмаларды орындауға мүмкіндік беретін пайдалы жүктемелердің әртүрлі түрлерін тасымалдауға қабілетті, қашықтан, жартылай автономды, автономды немесе аралас басқаруы бар, күштік қондырғымен жабдықталған бірнеше рет қолданылатын пилотсыз аппараттарды түсіну керек.

Ұшу ұзақтығына байланысты ұшқыштар маневрлік күштердің әрекеттерін қолдау үшін қысқа қашықтыққа (50 км-ге дейінгі қашықтық; ұшу ұзақтығы 6 сағатқа дейін), бригадалардың, дивизиялардың және теңіз күштерінің әрекеттерін қолдау үшін орташа қашықтыққа (200 км-ге дейінгі қашықтық; ұшу ұзақтығы 10 сағатқа дейін), күштердің әрекеттерін қолдау үшін ұзақ қашықтыққа ие болуы мүмкін. соғыс қимылдары театрында (қашықтығы 800 км-ден астам; ұшу ұзақтығы 24 сағаттан астам).

Ұшу биіктігі бойынша ұшуды төмен биіктікке (300 м. дейін), төмен биіктікке (3000 м. дейін), орташа биіктікке (8000 м. дейін) және биіктікке (8000 м. жоғары) бөлуге болады.

Қарулы қақтығыстар мен жергілікті соғыстар XX ғасырдың екінші жартысының әр онжылдығында үнемі пайда болды және XXI ғасырдың басында тоқтаған жоқ. Өз уақытында жаңа қару-жарақ пен әскери техниканы қолданған әскери қақтығыстардың тәжірибесін жалпылау әдетте екі кезеңнен тұрды. Бірінші кезеңде негізінен оқиға орындарынан жедел ақпарат таратылды. Екінші кезеңде, кейде бірнеше жыл қажет болса, тұжырымдар, әдетте, негіздеуге тырысты. Нәтижесінде қорытынды есеп мазмұны бойынша да, тиісті көрсеткіштері бойынша да ағымдағы ақпараттық хабарламалардан айтарлықтай ерекшеленді. Олардың жетістіктері енді асыра айтылмады, ал сәтсіздіктер үнсіз қалмады.

Көп ұлтты күштердің Иракқа қарсы соғысы (1991) қазіргі заманғы қару-жарақ пен әскери техниканы сынақтан өткізу алаңы ғана емес, сонымен қатар ұшқышсыз ұшу аппараттарын қолданудағы кемшіліктерді зерттеу және түсіну кезеңі болды. Американдық Pioneer және Pointer дрондарын барлау, бақылау және түзету үшін қолданудың тиімділігі көбінесе метеорологиялық жағдайларға және нысандарды бөлектеу үшін борттық лазерлік мақсаттардың болмауына байланысты болды.

Төмен биіктіктен барлау және бақылау жүргізуге арналған Pointer аппараттарының іс-әрекеттерінің сапасы олардың іс жүзінде бағдарлары жоқ шөлді аймақтың қолайсыз жағдайларына нашар бейімделуіне байланысты төмендеді. Көрсетілген кемшіліктер қатарына мыналар да кірді: қысқа диапазон (5 км. дейін), GPS жүйесінің навигациялық аппаратурасының болмауы; тек ақ-қара телевизиялық кескіндерді алу мүмкіндігі; қатты желде ұшқышсыз ұшу аппараттарының ұшуын басқарудағы қиындықтар.

Югославия аумағында (1999 ж.) әскери операция жүргізу барысында НАТО-ның Біріккен Қарулы күштерінің іс-әрекеттері НАТО мен АҚШ тарапынан жалпы оң сипатталғанына қарамастан, осы операция кезінде алынған тәжірибені зерттеу нәтижелері негізінде әскери-саяси басшылық кейбір жағымсыз тұстарды атап өтті.

Hawk - те үш спутниктік байланыс желісі болуы керек еді. Біріншісін Еуропадағы басқару пункті ұшқышсыз ұшу аппараттарының ұшуын басқару және оларға берілетін деректерді қабылдау үшін пайдаланды. Екінші жол бойынша алынған мәліметтер АҚШ-қа

анализа қимылдарын талдау және жоспарлау органдарының қарамағына жіберілді. Үшінші желі АҚШ-тан еуропалық басқару пунктіне борттық барлау аппаратурасын одан әрі пайдалану туралы нұсқаулар беру үшін пайдаланылды.

Екінші Ирак соғысында (2003 ж.) Global Hawk ҰҰА-ның жауынгерлік қолданылуы да өз ерекшеліктеріне ие болды. 2003 жылдың наурыз айының соңында Global Hawk UAV Бағдадқа бомбаның 30 ықтимал нысанасын бақылау үшін ауаға көтерілді. Алайда, деректерді өңдеу және беру процесінде туындаған асқынуларға байланысты барлау мәліметтері кешіктіріліп алынды. Кейінгі міндеттерді орындау барысында ұшқышсыз ұшу аппараттарының әрекеттері уақыт бойынша Ирактың Әуе қорғанысы жүйесін басуды және Ирак астанасы аймағындағы нысандарды жоюды жүзеге асырған тактикалық жауынгерлердің әрекеттерімен келісілді.

Зерттеу әдісі

Shadow 600 (Falcon 600) АҚШ-тың АІІ компаниясы әзірлеген (Түркия армиясында Falcon 600 деп аталған) көп мақсатты ұзақ қашықтықтағы ұшқышсыз ұшу аппараты. Ол нақты уақыт режимінде жұмыс істейтін теледидар камерасымен, алдыңғы көріністі аппаратурасымен және байланыс құралдарымен жабдықталған. Шөлді дауыл операциясында қолданылды.

Тактикалық-техникалық сипаттамалары:

Қанатының ұзындығы, 6,83 М.

Ұшақтың ұзындығы, 4,77 М.

Салмағы, 272 кг.

Максималды жылдамдық, 213 км/сағ.

Ұшу ұзақтығы, 14 сағат.

Практикалық төбе, 6700 М.

Gnat-750-general Atomics компаниясы әзірлеген барлау ұшағы. Ол ұзақ уақыт бойы барлауға және бақылауға арналған. Алғашқы рейс 1989 жылы жасалды. пайдалы жүктеме ретінде телевизиялық аппаратураны, ИҚ-аппаратурасын, РТР аппаратурасын, радиосигналды ретрансляторларды, радиациялық және химиялық барлау аппаратурасын пайдалануға болады.

1994 жылдан бастап Югославия соғысы кезінде (1993-1995) Босния үстінен барлау рейстерін орындау үшін қолданылды.

Тактикалық-техникалық сипаттамалары:

Қанатының ұзындығы, 10,75 м.

Ұшақтың ұзындығы, 5,32 м.

Салмағы, 518 кг.

Максималды жылдамдық, 259 км/сағ.

Ұшу қашықтығы, 2800 км.

Ұшу ұзақтығы, 12 сағат.

Практикалық төбе, 7620 м.

RQ - 1 Predator-американдық General atomics Aeronautical Systems (GaAs) фирмасы әзірлеген барлау алғашқы өрісі 1994 жылдың жазында болды, кешеннің сериялық өндірісі 1997 жылы басталды, actd (advanced Concept Technology Demon stration) бағдарламасы бойынша әзірленген Аппарат бақылауға, сондай-ақ барлауға арналған. Ол 955 мм. Spotter объективі бар екі түсті DTV бейнекамераларымен, ИҚ датчиктерімен (FLIR), синтезделген аппаратурасы бар радиолокатормен (Northrop Grumman шығарған) жабдықталған, бұл кез келген ауа-райында және күшті бұлттылықта барлауға, лазерлік нысанаға алу және бағыттау жүйесіне, РТР және РЭБ аппаратурасына мүмкіндік береді. Деректерді беру үшін Ku-band байланыс спутнигі арқылы жұмыс істейтін Trojan Spirit II немесе Global Broadcast спутниктік байланыс жүйесі қолданылады. Кешен құрамына Boeing корпорациясының data Exploitation Mission Planning Communication (DEMP)C intelligence work station W mission

Planning System жүйелерін қамтитын барлау станциясы кіреді. General Atomics Aeronautical Systems компаниясы сонымен қатар sea Predator деп аталатын ұшқышсыз ұшудың теңіз нұсқасын шығарады. Кешендердің біріншісі "Нимиц" тасымалдаушысына орнатылған. UAV Югославия, Ауғанстан және Ирактағы шайқастарға белсенді қатысты. Ауғанстанда алғаш рет оның барлау-перкуссиялық нұсқасы сыналды.

Тактикалық-техникалық сипаттамалары:

Қанат ұзындығы, 14,84 м.

Ұшақтың ұзындығы, 8,23 м.

Салмағы, 1035 кг.

Максималды жылдамдық, 130 км/сағ.

Ұшу қашықтығы, 740 км.

Ұшу ұзақтығы, 40 сағат.

Практикалық төбе, 7620 м.

Phoenix UAV Ұлыбританияда қызмет етеді. Олар 1998 жылы әскерлерге кірді (даму 12 жылға созылды) және бұрын қолданылған CL-59 "Миджін" ауыстырды. Phoenix UAV-да визуалды, радиолокациялық, инфрақызыл және акустикалық көріну аз. Ол екі Арқалық схема бойынша жасалған және қуаты 19 кВт екі тактілі бензин қозғалтқышымен жабдықталған. Ұшақтың төменгі жағында орналасқан пайдалы жүктемесі 45 кг-ға дейінгі ауыстырылатын контейнердің құрамына 60-40 градус көру өрісі бар Sprite (Signal Processing in the Element) ИҚ қабылдағышы бар жылу бейнелеу камерасы кіреді. (8-14 мкм диапазонында жұмыс істейді) және фокустық ұзындығы 2,5-тен 10 есеге дейін өзгертін линза. Айналымы мұнараға термиялық бейнелеу камерасы мен телефото линза орнатылған, бұл оларды жерден 360 градусқа сканерлеуге мүмкіндік береді. азимут пен орынның бұрышында. Ұшудағы шешілетін міндеттерге байланысты орынның бұрышы бойынша немесе көкжиекке алдын ала орнатылған еңіс бұрышы бар автоматты сканерлеу режимі қолданылуы мүмкін. Phoenix UAV сонымен қатар Сент-Нидерландыға қабылданды. Жауынгерлік жағдайда ол алғаш рет НАТО-ның Косоводағы соғыс қимылдары кезінде қолданылды.

Тактикалық-техникалық сипаттамалары:

Қанатының ұзындығы, 4,20 м.

Ұшақтың ұзындығы, 3,40 м.

Салмағы, 140 кг.

Максималды жылдамдық, 185 км/сағ.

Ауқымы, 50 км.

Ұшу ұзақтығы, 4 сағат.

Практикалық төбе, 12750 м.

Hermes 450-Silver Arrow әзірлеген көп мақсатты, ұзақ қашықтықтағы барлау ұшағы. Барлау мен бақылауды жүргізуге, сондай-ақ ақпаратты қайта таратуға арналған. Типтік пайдалы жүктеме ретінде elta el m-202h теңіз іздеу радиолокаторы, irtv 445g МК II, монохромды CONTRON ESP-1H немесе түрлі-түсті ESP-600C теледидар камералары, алдыңғы көріністі жылу түсіргіш орнатылады. Алғашқы рейс 1994 жылы сәуірде ұшқышсыз ұшу аппараттары Араб-Израиль қарулы қақтығысында действий кезінде қолданылды.

Тактикалық-техникалық сипаттамалары:

Қанатының ұзындығы, 10,20 м.

Ұшақтың ұзындығы, 6,21 м.

Салмағы, 450 кг.

Максималды жылдамдық, 185 км/сағ.

Ауқымы, 100 км.

Ұшу ұзақтығы, 24 сағат.

Практикалық төбе, 7000 м.

Heron - Israel aircraft кампустриес науқанының Malat филиалы әзірлеген орташа биіктіктегі ұзақ ұшатын барлау ұшағы. ҰҰА Араб-Израиль қарулы қақтығысында действий жағдайында қолданылған.

Тактикалық-техникалық сипаттамалары:

Қанатының ұзындығы, 16,6 м.

Ұшақтың ұзындығы, 8,5 м.

Салмағы, 1100 кг.

Ауқымы, 200 км.

Ұшу ұзақтығы, 30-50 сағат.

Практикалық төбе, 9144 м.

Нәтижелер мен талқылаулар

Қазіргі әскери қақтығыстарда ҰҰА қолданудың проблемалық мәселелері қазіргі заманғы әуе барлау құралдарының нақты мүмкіндіктерін, олардың "әлсіз" жерлерін, сондай-ақ жақын болашақта оларды одан әрі дамытудың перспективалық бағыттарын бағалауға мүмкіндік береді.

Вьетнамда ұшқышсыз ұшу аппараттарына барлау міндеттерін орындау ғана емес жүктелді. Жауынгерлік іс-қимыл кезеңінде жаудың зениттік артиллериясын басу, американдық армия бөлімшелеріне қару-жарақты тағайындау және жеткізу міндеттерін шешу үшін бірнеше демонстрациялық бағдарламалар жүзеге асырылды. Атап айтқанда, бомбаларды тастау және басқарылатын зымырандарды ұшыру бойынша сынақтар сәтті өтті.

Әуе қорғанысы құралдарының радиолокациялық станциялары үшін олардың көрінуін азайту ұшқышсыз ұшу аппараттарының мөлшерін азайтумен қатар маңызды тенденция болып табылады. Ұшқышсыз ұшу аппараттары полимерлі композициялық материалдарды қолданумен сипатталғанымен, бұл пилотсыз барлау аппараттарын зениттік артиллерия немесе басқа әуе шабуылына қарсы қорғаныс құралдарының әсерінен құтқармады. Мысал ретінде НАТО-ның Югославиядағы Біріккен Қарулы күштерінің операциясы (1999 ж.), сербтер ұшқышсыз ұшу аппараттарымен күресу үшін портативті зениттік зымыран кешендерінен, шағын калибрлі зениттік артиллериядан және атыс қаруынан басқа авиацияны, атап айтқанда Ми-8 тікұшақтарын қолданған кезде. Жылдамдықты төмен жылдамдықты дрондармен теңестіре отырып, Ми-8 оларды борттық люкке орнатылған 7,62 мм пулеметтен атып тастады.

Келесі тенденция ұшқышсыз ұшу аппараттарын және оның ақпараттылығын қолдана отырып, әуе барлауының жеделдігінің артуы деп саналуы керек.

Әскерлердің ұтқырлығы мен действий динамикасының артуы нақты уақыт ауқымында немесе оған жақын барлау деректерін алу қажеттілігін анықтады. Осыған байланысты американдықтар суретті нақты уақыт режимінде тарату үшін бірнеше AQM-34L теледидар камераларымен және таратқыштармен жабдықтады. Мұндай модельдер AQM-34L/TV деп белгіленді. Олар сәтті орындалған тапсырмалардың жоғары пайызы бар пилотсыз скауттың ең сәтті моделі болды.

Шөл дауылы операциясында көпұлтты күштер пайдаланған Pioneer және Shadow 600 ұшақ ұшақтарында нақты уақыт режимінде жұмыс істейтін теледидар камералары, сондай-ақ инфрақызыл алдыңғы көру жүйелері пайдалы жүктеме ретінде болды. Шешенстандағы терроризмге қарсы операцияға қатысқан Ресейлік ҰҰА да теледидар камераларымен жабдықталған.

Ауғанстан мен Ирактағы миссиясын жүзеге асырған Predator UAV екі түсті бейнекамерамен, инфрақызыл датчиктермен, синтезделген аппаратурасы бар радиолокациялық станциямен жабдықталған, бұл оларға спутниктік байланыс жүйесі қолданылған ақпараттың жоғары ақпараттылығы мен толықтығын қамтамасыз ете отырып, нақты уақыт режимінде барлау жүргізуге мүмкіндік берді.

Global Hawk стратегиялық барлау ұшағы жоғары биіктікте ұшу кезінде үлкен аумақтарды шолуға, жоғары ажыратымдылықтағы нүктелік нысандарды барлауға және нақты уақыт режимінде ақпарат беруге қабілетті. Дронда электромагниттік спектрдің әртүрлі учаскелерінде бір уақытта жұмыс істейтін барлау аппаратурасының үш ішкі жүйесі орнатылған: синтезделген апартурасы бар радиолокациялық станция, оптикалық-электрондық цифрлық камера және инфракызыл аппаратура.

Пилотсыз авиацияны дамыту барысында пайда болған тенденцияны кез-келген ауа-райында ұшқышсыз ұшу аппараттарын қолдана отырып, тәулік бойы әуе барлауын жүргізу деп атауға болады.

Электромагниттік спектрдің әртүрлі диапазондарында жұмыс істейтін барлау аппаратурасын құру және онымен ұшқышсыз ұшу аппараттарын жарақтандыру тәуліктің күндізгі уақытында қарапайым метеожағдайларда әуе барлауын жүргізуден кез келген ауа райы жағдайында тәулік бойы әуе барлауын жүргізуге көшуге мүмкіндік берді.

AQM-34L Firebee UAV-да электромагниттік спектрдің көрінетін бөлігінде жұмыс істейтін камералар (немесе теледидар камералары) орнатылды. Осыған байланысты барлау тек күндізгі уақытта жүргізілді. Pioneer және Shadow 600 UAV пайдалы жүктеме ретінде электромагниттік спектрдің көрінетін бөлігінде жұмыс істейтін теледидар камераларынан басқа инфракызыл алдыңғы көру жүйелеріне ие болды. Инфракызыл аппаратураның болуы түнде қарапайым метеожағдайларда (оптикалық-электрондық тракт) барлауға мүмкіндік берді.

Атмосфераның ашықтығының кез келген жағдайында тәулік бойы барлау жүргізу мүмкіндігін синтезделген апертурасы бар радиолокациялық станциямен жабдықталған Predator ҰҰА көрсетті. Дрондар коалициялық қолбасшылық тағайындаған аудандарға тәулік бойы әуе барлауын жүргізген кезде, Ауғанстандағы терроризмге қарсы операция кезінде осы ұшқышсыз ұшақтарды белсенді қолдану маңызды болды.

Парсы шығанағы аймағындағы Иракқа қарсы көпұлтты күштердің соғысына дейін (1991 ж.) жаудың жер үсті нысандарына әуе барлау жиілігі мәселесі оның маңыздылығына байланысты берілген нысанды барлау үшін тәулігіне ұшақтардың санын белгілеу арқылы шешілді. Соғыс нәтижелері қалыптасқан тәжірибені жоққа шығарды, жаңа талап қойылды - соққы объектісі жойылғанға дейін оны үздіксіз бақылауды қамтамасыз ету. Жоғары жылдамдыққа ие және ұшу ұзақтығының онша көп емес қоры бар басқарылатын тактикалық және жедел-тактикалық барлау авиациясы, әсіресе жау объектілерінің жоғары ұтқырлығы жағдайында (мысалы, Ирак қызметінде тұрған "Скад" жедел-тактикалық кешені) барлаудың жоғары тиімділігін қамтамасыз ете алмады.

Бұл жағдайда пилотсыз авиация барлаудың таптырмас құралына айналды, ауада болу уақытының айтарлықтай маржасы болды.

Ұшу аппараттарының әуе кеңістігінде болу ұзақтығының артуы ұшу ауқымын ұлғайту мәселесін шешуге мүмкіндік берді. Егер 70 км қашықтықтағы кеңестік BP-3 "Рейс" ұшқышы 200 км-ге дейін тікелей ұшуға қабілетті болса, онда RQ-1A нұсқасындағы Predator ұшқышсыз ұшағының ұшу қашықтығы 740 км, ал RQ-1b нұсқасында 950 км. бәсекелестіктен тыс стратегиялық Global Hawk ұшқышсыз ұшағы бар, оның ұшу қашықтығы мыңдаған километрмен өлшенеді.

Пилотсыз авиацияны дамытудың маңызды кезеңі оны соққы беретін авиация міндеттерін шешу үшін пайдалану болды. Егер Вьетнам соғысы кезінде ҰҰА-ның соққы нұсқасын жасау идеясы іс жүзінде іске асырылмаса (бағдарламалар тоқтатылды), онда XX ғасырдың 80-90-шы жылдарында ол өзінің нақты дамуын алды. 2001 жылы Ауғанстан аумағындағы терроризмге қарсы операция барысында Predator ҰҰА барлау міндеттерін шешу үшін ғана емес тартылды.

Операцияның ерекшелігі-аппараттардың бір бөлігі алғаш рет танкке қарсы басқарылатын зымырандарға соққы беріп, соққы беретін ұшақтармен бірге жұмыс істеді.

Германияда Taifun battle UAV (басқарылатын бомба) әзірленді, ол жанармай қоймаларын, артиллерияны, командалық пункттерді және басқа да материалдық объектілерді жоюға арналған.

Соңғы онжылдықтардағы әскери қатығыстардың тәжірибесін талдау қазіргі заманғы соғыстардың төртінші (Екінші дүниежүзілік соғыс кезеңі) және бесінші (XX ғасырдың екінші жартысы) ұрпақтардан түбегейлі ерекшеленетінін көрсетеді. Олар жаңа мән мен жаңа мазмұн алды. Алтыншы буын соғыстары жоғары дәлдіктегі қаруды белсенді қолданумен сипатталады, ол өзінің жойқын күші бойынша ядролық қаруға тең, ал қуаты бойынша кейде оның мүмкіндіктерінен де асып түседі. Мұндай соғыстардағы қарулы күрес негізгі соғыс театрына айналатын жерге жақын кеңістікке көшті.

Әскери іс-қимылдардың кеңістіктік ауқымын кеңейтумен қатар, қазіргі заманғы қарулы қатығыстар мен жергілікті соғыстардың маңызды белгісі қарулы күрестің уақытша көрсеткіштерінің өзгеруі болып табылады, бұл қару-жарақ пен әскери техниканың жаңа үлгілерін қолдану арқылы оның жоғары динамизмі мен өтпелілігіне байланысты.

Қарулы күрестің кеңістіктік көрсеткіштерінің кеңеюі, ақпараттық фактордың тез өсуі және ғарыштағы әрекеттер, сондай-ақ басқарылатын қаруды кеңінен қолдану қарулы күресті басқарудың жаһандану тенденциясын және басқарылатын қарудан басқарылатын қарулы күреске дейінгі схемаға біртіндеп көшуді анықтайды.

Қазіргі заманғы қарулы күрестің ең тән ерекшелігі-барлау, деректерді беру, әскерлер мен қаруды басқару, жаудың нақты уақытқа жақын уақыт шкаласында атыс (радиоэлектрондық) жеңілісінің интеграцияланған процесі. Қазіргі заманғы операциялардың тәжірибесі әлемнің жетекші елдерінің барлаудың барлық түрлерін жүргізуге қызығушылығының артқанын көрсетеді. Алтыншы буын соғыстарында кез-келген жағдайда кез-келген алшақтықта кез-келген мақсатты ашуға мүмкіндік беретін жаңа жоғары тиімді барлау құралдарын мақсатты түрде құруға және қолдануға байланысты барлау жаһандық сипатқа ие болды.

Көпұлтты күштердің Иракқа қарсы "шөлді дауыл" операциясын (1991 ж.), НАТО - ның Біріккен Қарулы Күштерінің Югославиядағы "одақтас күш" операциясын (1999 ж.), АҚШ бастаған коалициялық күштердің Ауғанстандағы терроризмге қарсы операциясын (2001 ж.) және "Ирак бостандығы" операциясын (2003 ж.) дайындауы мен жүргізуінің нәтижелері Парсы шығанағы аймағында екпіндердің аэроғарыштық барлауға ауысуының айқын дәлелі болды. Операциялар (бо қимылдары) кезінде жаудың жердегі объектілері туралы барлау ақпаратының көп бөлігі аэроғарыштық барлау құралдарын қолдану арқылы өндірілді.

Батыс әскери мамандары қазіргі жауынгерлік жағдайда барлау ұшақтары басқарылатын барлау ұшақтарына қарағанда тактикалық әуе барлау және электронды күрес, атысты, жауынгерлік басқару мен байланысты, метеорологиялық, радиациялық, химиялық және биологиялық барлау міндеттерін әр түрлі командованиенің мүддесі үшін жеке құрамға қауіп төндірмей шешеді деп санайды Қарулы Күштер түрлерінің деңгейлері. Бұл ретте алынған барлау ақпаратын тиісті басқару буынына жеткізу уақыты қысқарады. Ұшқышсыз ұшу аппараттары соғыс аймағының алдыңғы шетіне жақын жерде де, жау аумағының үстінде де әрекет ете алады.

"Шөлді дауыл" операциясының, Босния мен Герцеговинадағы бітімгершілік операцияларының, "одақтас күш" операциясының, Ауғанстандағы терроризмге қарсы операцияның және "Ирак бостандығы" операциясының нәтижелері бойынша пилотсыз авиация қазірдің өзінде басқарылатын авиацияны қолдана отырып, ғарыштық барлау және барлаумен бірге американдық өзара байланысты барлау триадасын құрайтын өкілетті құрамдас бөлікке айналды деп сенімді түрде айтуға болады, сондай-ақ әлемнің жетекші елдері мен НАТО-ның бірқатар елдерінің авиациялық паркінің маңызды құрамдас бөлігі.

Олар бойынша мақсаттардың ықтимал орналасқан аудандарына және оларды орналастыру аудандарына Талдамалық бағалау жүзеге асырылады, оның нәтижелері бойынша барлау жүргізудің берілген аудандарына білдің ұшу маршруттары тандалады.

Жаудың әуе кеңістігінің тереңдігінде патрульдеу ұзақтығының маңыздылығы осы қасиет қарсаңында ҰҰА-ны анықтау құралына емес, жаудың маңызды мобильді мақсаттарын жедел бақылау және сүйемелдеу құралына айналдыратындығына байланысты.

Ұшқышсыз авиациядағы революциялық серпіліс тек әуеде ұзақ уақыт болатын барлау ұшақтарының пайда болуымен шектелмейді. Соңғы жылдары шағын және микро ҰҰА-ның жаңа перспективалық бағыты пайда болды.

Шағын қанатты портативті ұшқышсыз ұшуды бір оператор сарбаз басқара алады. Ұшуды басқару және ақпарат алу әдеттегі қол корпусы түріндегі портативті құрылғы арқылы жүзеге асырылады. Мұндай шағын ұшқышсыз ұшақтың мысалы-американдық Raven аппараты, оның қанаты 1,34 м-ден аспайды, бүкіл әлемде, әсіресе Еуропа елдерінде шағын өлшемді ұшқышсыз ұшақтарға қызығушылық артып келеді.

Әскери бөлімшелерді барлау құралы ретінде микро ұшқышсыз ұшу аппараттарын құру идеясы mit мамандарына тиесілі. Құс өлшеміндегі мұндай құрал әсіресе қала жағдайында соғыс қимылдарын жүргізуде тиімді деп саналады және жағдайды бақылаудан басқа, химиялық және биологиялық қарудың элементтерін анықтау, анықтау үшін қолданылуы мүмкін.

Микро-ұшқышсыз ұшу аппараттарына келесі жалпы талаптар қойылады: ұзындығы 6-20 см., ұшу салмағы 10-100 г., пайдалы жүктеме салмағы 1-18 г., ұшу уақыты 20-60 мин., Жылдамдығы 30-65 км/сағ. ұшу қашықтығы 1-10 км. мұндай құрылғыларды жасау үшін қажетті кейбір технологиялық элементтер бұрыннан бар, бірақ олардың көпшілігі әзірленуге немесе жетілдірілуге жатады. Микро ұшақ жасаудың басты мәселесі энергия: барлық мәселелерді шешу үшін борттағы шағын және жеңіл көлемге жеткілікті қуатты қалай жинауға болады.

Микро ұшқышсыз ұшу аппараттары үшін ең жетілдірілгені барлау құралдары болып саналады. Көрінетін (массасы 1 г.) және инфрақызыл (массасы 10 г.) ерік диапазондарының, радиотехникалық, акустикалық және биохимиялық барлаудың миниатюралық оптикалық-электронды барлау аппаратурасы бар.

Wasp құрылғысы алғашқы микро ұшқышсыз ұшақтарды құрудың мысалы бола алады. Оны AERO Vironment компаниясы АҚШ ҚМ Жетілдірілген зерттеулер мен әзірлемелерді басқару үшін жасаған.

Айта кету керек, АҚШ-тың Әскери-әуе күштері барлау ұшақтарын перспективалы пайдаланудың әртүрлі нұсқаларын белсенді түрде зерттеп жатыр. Мысалы, барлау жүргізу үшін шағын ұшқышсыз ұшақтарды пайдалану мүмкіндігі қарастырылуда. Аэронавигациялық Қолданбалы технологиялар бойынша американдық сарапшылар болашақта әуе тасымалдаушыларынан ұшырылатын және воздухе тапсырмасын орындағаннан кейін ауаны алу арқылы құтқарылатын қайта пайдалануға болатын ұшқышсыз ұшу аппараттарын құруға болады деп санайды.

2000 жылы американдық заң шығарушылар 2010 жылға қарай АҚШ Әскери-әуе күштерінің үлкен қашықтықтағы жердегі нысандарға соққы беруге арналған қаражаты отыз пайыздан астам пилотсыз соққы машиналарынан тұруы керек деген құжатты қабылдады. Бұл қашықтан басқарылатын немесе автономды жауынгерлік ұшақтар, американдық стратегтердің ойынша, жаудың терең артқы жағында жақсы қорғалған нысандарды анықтауға, содан кейін жоюға байланысты ұшу тапсырмаларын орындай алады, бұл басқарылатын ереуіл авиациясының ұшақтары үшін өте қауіпті болып саналады.

АҚШ-та жаңа барлау, барлау-перкуссия және перкуссиялық ҰҰА құру жұмыстары екі бағытта жүргізілуде: жаңа міндеттерді шешу үшін қолданыстағы аппараттарды орналастыру; іске асыру айтарлықтай шығындарды қажет етпейтін жаңа

тұжырымдамаларды әзірлеу. Бұл жұмыстарды Boeing, Lockheed Martin және General Atomics жүргізеді.

Boing компаниясының күш-жігері ультра ұзақ ұшатын ұшқышсыз ұшу тұжырымдамасын әзірлеуге бағытталған, оның негізгі идеясы электр қозғалтқышының қуат көздерінің экологиялық таза су-отын элементтерімен шамамен 30 м. үлкен ұзартылған канатты конструктивті біріктіру болып табылады.

Дрон таулы жерлерде теңіз деңгейінен 2000 м. биіктіктегі алаңдарда ұшыру және қону кезінде және биіктігі 5000 м. дейінгі таулы аудандарда ұшу кезінде өзін жақсы дәлелдеді. таулы аудандарда қолданған кезде "Рейс" кешені жаудың әуе қорғанысы құралдарына іс жүзінде қол сұғылмайтын болды, бұл оны әскери операцияларды жүргізудің тамаша құралына айналдырды Кавказ және Азия театрының таулы аймақтарында, сондай-ақ Еуропаның таулы аймақтарында.

Рейс кешені Чехословакияға, Румынияға және Сирияға жеткізілді, онда ол 1980 жылдардың басында Ливан қақтығысы кезіндегі қимылдарына қатысты.

Қорытынды

Ұшқышсыз авиация жетінші буын соғыстарында аэроғарыштық барлау жүйесінде ерекше орын алады. Ұшқышсыз ұшу аппараттары саласындағы революциялық серпіліс оларды әлемнің көптеген елдерінің соғыс уақытында да, бейбіт уақытта да әртүрлі міндеттерді орындау үшін одан әрі белсенді пайдалануына әкеледі. Барлау құралдарын олардың мөлшерін азайту бағытында дамыту құстың көлеміндей (немесе одан да аз!) және ұшу қашықтығы он шақырымға дейін. Ең дұрысы, мұндай "ұшақ" ұзақ уақыт бойы жау позицияларынан жоғары ұшудың тәсілі болады, бұл соңғысына көрінбейді, бұл қала жағдайында мүмкін болатын қимылдарын жүргізу кезінде өте маңызды. ХХІ ғасырдың бірінші онжылдығы. әртүрлі мақсаттағы пилотсыз авиацияның жаппай дамуымен ерекшеленеді.

Радиоэлектрондық барлауды жүргізу үшін ірі ұшқышсыз ұшу аппараттарын пайдалану мүмкіндігі таулы аймақтарда ерекше маңызды, өйткені ұшудың үлкен биіктігі сигналдарды төменгі биіктіктен ұстап алу мүмкін болмайтын осындай радиоэлектрондық құралдардың жұмысын бақылауға мүмкіндік береді.

Пайдаланған әдебиеттер тізімі

1. Ганин С.М., Карпенко А.В., Колногоров Н. Н., Петров Г.Ф. Беспилотные летательные аппараты, 2021.
2. Мосов С. «Полет из пушки на луну» или альтернативные способы покорения ближнего космоса // Волонтер. - 2017.
3. Ильин В., Скрынников А. Боевое применение БЛА // Вестник авиации и космонавтики. 2018.
4. Разведывательные БПЛА США / иностранная печать об экономическом, научно-техническом и военном потенциале государств участников СНГ и технических средствах их выявления. Серия: Технические средства разведывательных служб зарубежных государств // ЕИБ ВИНТИ. - 2019.
5. Мосов С. Розвиток збройної боротьби у війнах майбутнього // Супер Волонтер. - 2005.
6. Беспилотные летательные аппараты / П.М. Афонин, И.С. Голубев, Н.И. Колотков и др. / Под ред. Л.С. Чернобровкина. - М.: Машиностроение, 2017.
7. Санін Ф.П., Джур Л.Д., Кучма В.В., Хуторний В.В. Розвиток ракетно-космічної техніки в Україні. - Дніпропетровськ: АРТ-ПРЕС, 2012.

УДК 623.46

Т.И.Уразбагамбетов, М.Б.Казанцев, Б.З.Татенов

*Военный институт Сил Воздушной обороны имени Т.Я. Бегельдинова,
Республика Казахстан, город Актөбе*

АНАЛИЗ ОТКАЗОВ И НЕИСПРАВНОСТЕЙ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ВОЕННО-ВОЗДУШНЫХ СИЛ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Андатпа: Мақалада Қазақстан Республикасы Қарулы Күштері Әуе қорғанысы күштерінің (ҚР ҚК ӘҚК) авиациялық техникасының істен шығу құрылымы мен себептеріне кешенді техникалық талдау ұсынылған. Зерттеу нысандары ретінде майдандық, жойғыш және армиялық авиацияның негізгі әуе кемелері таңдалды: Су-30СМ көпмақсатты жойғышы, МиГ-31Б дыбыстан жүйрік тосып алушысы және Ми-8 көліктік-шабуылдаушы тікұшағы. Қазақстан Республикасы Қорғаныс министрлігі (ҚР ҚМ) Ұшу қауіпсіздігі департаментінің статистикалық деректерін және объективті бақылаудың бортындағы жүйелерін жүйелі талдау негізінде авиациялық платформалардың ең осал тораптары мен конструкциялық элементтері анықталды. Жұмыста аймақтың күрт континенталды климаттық факторларының жүйелердің пайдалану сенімділігіне деструктивті әсері егжей-тегжейлі қаралды. Газтурбинді қозғалтқыштар турбиналары қалақшаларының термиялық шаршау механизмдеріне, планер элементтерінің құм-шаң қоспаларымен абразивті эрозиялық тозу процестеріне, сондай-ақ жоғары жазғы температура жағдайында цифрлық бортындағы электрониканың тұрақтылығына ерекше назар аударылды. Анықталған ақауларды салыстыру үшін әртүрлі технологиялық буындағы әуе кемелерінің функционалдық жүйелері бойынша істен шығу критикалылығын бөлудің мамандандырылған матрицасы әзірленді. Алынған нәтижелер негізінде Қазақстанның әскери авиациясына техникалық қызмет көрсету мен жөндеудің (ТҚКЖЖ) қолданыстағы жүйесін жаңғыртудың кешенді стратегиясы тұжырымдалды. Күнтізбелік-ресурстық регламенттерден бұзылмайтын бақылау әдістері негізінде нақты техникалық жай-күйі бойынша болжамды қызмет көрсетуге көшу ұсынылды. «№ 405 авиажөндеу зауыты», «АА № 406 авиажөндеу зауыты» АҚ және «Тыныс» АҚ сияқты отандық қорғаныс-өнеркәсіп кешені (Сатып алу жүйесін жетілдіру, техниканы толық ауыстырудың орнына жаңғырту, Қарулы Күштерді цифрландыру, энергия тиімділігі және пайдалану шығындарын азайту, отандық өндірісті дамыту, техникалық қызмет көрсету сапасын арттыру, Қарулы Күштер құрлымын оңтайландыру) кәсіпорындарында жөндеу өндірісін оқшаулауды тереңдетудің мақсатқа сәйкестігі негізделді. Ұсынылған ұсынымдарды іске асыру мемлекеттің импортқа тәуелділігін төмендетуге және авиация паркінің жарамдылық коэффициентін арттыруға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: Қазақстан Республикасы Қарулы Күштерінің Әуе қорғанысы күштері (ҚР ҚК ӘҚК), авиациялық техниканың сенімділігі, инженерлік-авиациялық қамтамасыз ету, Су-30СМ, МиГ-31Б, Ми-8, тартым күшінің бағытталатын векторы, абразивті тозу, термиялық шаршау, болжамды қызмет көрсету, жөндеуді оқшаулау.

Abstract: The paper presents a comprehensive technical analysis of the structure and causes of aviation equipment failures in the Air Defense Forces of the Republic of Kazakhstan (ADF AF RK). The key aircraft types of tactical, fighter, and army aviation were selected as the objects of study: the Su-30SM multirole fighter, the MiG-31B supersonic interceptor, and the Mi-8 transport-assault helicopter. Based on a systematic analysis of statistical data from the Flight Safety Department of the Ministry of Defense of the RK and onboard flight data recorders, the most vulnerable components, assemblies, and structural elements of the studied aircraft platforms were identified. The paper examines in detail the destructive influence of specific geographical and sharply continental climatic factors of the region on the operational reliability indicators of the

systems. Particular attention is paid to the mechanisms of thermal fatigue of gas turbine engine turbine blades, the processes of abrasive erosive wear of airframe elements by fine sand-dust mixtures, and the operational stability of digital onboard electronics under extreme summer temperatures. To compare the identified defects, a specialized system failure criticality distribution matrix was developed across the key functional systems of aircraft from different technological generations. Based on the results, a comprehensive science-based strategy for modernizing the existing maintenance, repair, and overhaul (MRO) system of Kazakhstan's military aviation was formulated. A phased transition from obsolete calendar-and-lifetime resource regulations to predictive maintenance based on the actual technical condition via modern non-destructive testing and precision defectoscopy is proposed. Additionally, the feasibility of deepening repair localization at domestic enterprises of the military-industrial complex, such as JSC Aviation Repair Plant No. 405, JSC Aviation Repair Plant No. 406 CA and JSC Tynys, is justified. The implementation of the proposed recommendations will significantly reduce the import dependence of the state defense sector, optimize defense budget expenditures (improving the procurement system, modernizing instead of completely replacing equipment, digitalizing the armed forces, energy efficiency and reducing operating costs, developing domestic production, improving the quality of maintenance, and optimizing the structure of the armed forces), and substantially increase the overall availability and combat readiness rate of the aircraft fleet.

Keywords: Air Defense Forces of the Republic of Kazakhstan (ADF AF RK), aircraft reliability, engineering and aviation support, Su-30SM, MiG-31B, Mi-8, thrust vector control, abrasive wear, thermal fatigue, predictive maintenance, repair localization.

Аннотация: В статье представлен комплексный технический анализ структуры и причин отказов авиационной техники Сил воздушной обороны вооруженных Сил Республики Казахстан (СВО ВС РК). В качестве объектов исследования выбраны ключевые типы воздушных судов фронтовой, истребительной и армейской авиации: многоцелевой истребитель Су-30СМ, сверхзвуковой перехватчик МиГ-31Б и транспортно-штурмовой вертолёт Ми-8. На основе системного анализа статистических данных Департамента безопасности полетов Министерства обороны Республики Казахстан (МО РК) и материалов бортовых накопителей объективного контроля выявлены наиболее уязвимые узлы, агрегаты и конструкционные элементы исследуемых авиационных платформ. В работе подробно рассмотрено деструктивное влияние специфических физико-географических и резко континентальных климатических факторов региона на показатели эксплуатационной надежности систем. Особое внимание уделено механизмам термической усталости лопаток турбин газотурбинных двигателей, процессам абразивного эрозионного износа элементов планера мелкодисперсными песчано-пылевыми смесями, а также стабильности функционирования цифровой бортовой электроники в условиях экстремально высоких летних температур. Для сопоставления выявленных дефектов разработана специализированная матрица распределения критичности отказов по ключевым функциональным системам воздушных судов разных технологических поколений. На основе полученных результатов сформулирована комплексная научно обоснованная стратегия модернизации существующей системы технического обслуживания и ремонта (ТО и Р) военной авиации Казахстана. Предложен поэтапный переход от устаревших календарно-ресурсных регламентов к предиктивному сервису по фактическому техническому состоянию на базе современных методов неразрушающего контроля и прецизионной дефектоскопии. Дополнительно обоснована экономическая, техническая и логистическая целесообразность углубления локализации ремонтного производства на отечественных предприятиях оборонно-промышленного комплекса, таких как АО «Авиаремонтный завод № 405», АО «Авиаремонтный завод № 406 ГА» и АО «Тыныс». Реализация предложенных рекомендаций позволит существенно снизить импортозависимость оборонного сектора государства, оптимизировать расходы

оборонного бюджета (совершенствование системы закупок, модернизация вместо полной замены техники, цифровизация вооруженных сил, энергоэффективность и снижение эксплуатационных затрат, развитие отечественного оборонного производства, повышение качества технического обслуживания, оптимизация структуры вооруженных сил) и значительно повысить общий коэффициент исправности и боеготовности авиационного парка в рамках обеспечения национальной безопасности.

Ключевые слова: Силы воздушной обороны вооруженных Сил Республики Казахстан (СВО ВС РК), надежность авиационной техники, инженерно-авиационное обеспечение, Су-30СМ, МиГ-31Б, Ми-8, управляемый вектор тяги, абразивный износ, термическая усталость, предиктивное обслуживание, локализация ремонта.

Введение

Обеспечение суверенитета и защита воздушных рубежей Республики Казахстан напрямую зависят от боеготовности и эксплуатационной надежности авиационного парка Сил воздушной обороны (СВО ВС РК). В настоящее время структура военной авиации Казахстана носит гетерогенный характер: наряду со сверхсовременными многофункциональными комплексами поколения «4+» (Су-30СМ) на вооружении состоят проверенные временем, но физически и морально устаревающие советские платформы (МиГ-31Б, Ми-8 модификаций МТ/МТВ) [2].

Эксплуатация авиационной техники (АТ) в центрально азиатском регионе сопряжена с воздействием экстремальных климатических факторов. К ним относятся резко континентальный климат (годовой перепад температур достигает 80 °С), сильная запыленность нижних слоев атмосферы в южных и западных регионах страны, а также высокая интенсивность полетов в рамках боевого дежурства. Системный анализ отказов и неисправностей данных типов воздушных судов (ВС) позволяет выявить наиболее уязвимые элементы конструкций, оптимизировать регламенты технического обслуживания и минимизировать риски авиационных происшествий по техническим причинам [3].

Метод исследования

Учет и анализ неисправностей в СВО ВС РК осуществляются инженерно-авиационной службой (ИАС) в соответствии с требованиями Наставления по инженерно-авиационному обеспечению [2]. Все регистрируемые дефекты подразделяются на три базовые категории:

Конструктивно-производственные недостатки (КПН) – дефекты, заложенные на этапе проектирования или допущенные заводами-изготовителями при сборке и капитальном ремонте.

Износные и усталостные явления (ИЭ) – повреждения, возникающие вследствие естественного старения материалов, коррозии, вибрационных и термических нагрузок при исчерпании назначенного ресурса.

Ошибки технического обслуживания (ОТО) – неисправности, вызванные нарушением технологии регламентных работ, использованием некондиционных горюче-смазочных материалов (ГСМ) или недостаточным контролем со стороны наземных специалистов.

[Структура анализа надежности ВС]

[Фактор климата]

[Конструкция узлов]

[Человеческий фактор]

• Перепады температур

• Механика УВТ

• Качество ТООР

• Запыленность (песок)

• Усталость лопаток ГТД

• Объективный контроль

Анализ отказов многоцелевых истребителей Су-30СМ

Су-30СМ представляет собой вершину технологического развития фронтовой авиации Казахстана. Наличие двигателей АЛ-31ФП с управляемым вектором тяги (УВТ) и

интегрального БРЭО обеспечивает превосходство в воздухе, но предъявляет жесткие требования к качеству аэродромного обслуживания [9].

Уязвимости узлов управляемого вектора тяги

Поворотные сопла двигателей АЛ-31ФП работают в условиях циклических знакопеременных нагрузок при экстремально высоких температурах выхлопных газов. Основными дефектами здесь выступают:

Утечки рабочей жидкости в контуре гидросистемы УВТ: высокие пульсации давления при резком маневрировании приводят к усталостным микротрещинам подводящих трубопроводов.

Износ уплотнительных элементов сопла: воздействие мелкодисперсной пыли (в условиях аэродромов юга РК) ускоряет абразивную деструкцию графитовых и металлических уплотнений, вызывая прогар сегментов.

Сбои цифровых каналов БРЭО и СДУ-10

Электродистанционная система управления СДУ-10 обладает высокой степенью резервирования, однако в летний период при температурах наружного воздуха свыше +40 °С фиксируются:

Ложные срабатывания встроенных систем контроля (тест-контроль) на этапе предполётной подготовки, вызванные локальным перегревом вычислительных блоков при нахождении ВС на стоянке без кондиционирования.

Нестабильная работа блоков РЛС «Барс» из-за повышенной влажности или резкой смены температур при скоростном наборе высоты (конденсатообразование).

Анализ неисправностей истребителей-перехватчиков МиГ-31Б

Самолеты МиГ-31Б составляют основу противовоздушной обороны РК. Длительные сроки эксплуатации и специфика выполнения полетов на сверхзвуковых режимах определяют характер их отказов, где преобладают усталостные процессы и старение материалов [5].

Критический контур неисправностей МиГ-31Б

[Двигатель Д-30Ф6]

[Планер и кабельные сети]

- Термическая усталость лопаток турбины
- Деструкция изоляции проводки
- Помпаж из-за сбоев топливной автоматики
- Межкристаллитная коррозия

шпангоутов

Термическая усталость силовой установки Д-30Ф6

Тяжелые двухконтурные двигатели Д-30Ф6 работают в режимах высоких тепловых напряжений. Статистика расследований инцидентов (включая аварийные случаи в Карагандинском авиационном гарнизоне) выделяет следующие системные проблемы:

Разрушение и обрыв лопаток турбины низкого и высокого давления вследствие термической усталости. В условиях эксплуатации микротрещины развиваются скрытно, что требует внедрения более чувствительных методов неразрушающего контроля (рентгенография, вихретоковый метод).

Отказы агрегатов регулирования форсажного контура: нестабильная работа гидромеханических регуляторов топлива приводит к неравномерному факелу распыла, помпажным явлениям и риску локального пожара внутри гондолы двигателя.

Старение электрокабельных сетей и планера

Потеря эластичности изоляции: длительное воздействие высоких температур вблизи горячих зон двигателей приводит к растрескиванию изоляционных слоев бортовой проводки. Это вызывает ложные сигналы систем сигнализации (например, ложное срабатывание табло «Пожар двигателя»).

Коррозия силовых элементов: в узлах сопряжения титановых и стальных деталей планера под воздействием атмосферного конденсата развивается электрохимическая и межкристаллитная коррозия, снижающая прочностные характеристики шпангоутов крепления шасси.

Специфика отказов армейской авиации (на примере вертолетов Ми-8)

Вертолеты семейства Ми-8 (Ми-8МТ, Ми-171Ш) выполняют задачи в непосредственном контакте с грунтовыми площадками, что обуславливает специфический характер износа динамических систем [4].

Абразивная эрозия компрессора двигателей ТВЗ-117

При взлете и посадке в пустынных или степных зонах Казахстана несущий винт поднимает плотные облака пыли и песка. Попадание мелкоабразивных частиц в проточную часть двигателя вызывает:

Эрозионный износ лопаток компрессора: уменьшение толщины хорды лопатки и изменение ее профиля снижают запас газодинамической устойчивости двигателя, провоцируя помпаж при резком увеличении шага винта.

Износ защитного контура пылезащитных устройств (ПЗУ): падение эффективности сепарации песка приводит к ускоренному коксованию топливных форсунок.

Вибрационная повреждаемость планера

Усталостные трещины хвостовой и концевой балок: постоянный уровень вибраций, генерируемый рулевым винтом, приводит к появлению трещин в районе шпангоутов № 14–17.

Перегрев редуктора ВР-14: в условиях летних температур (+38...+42 °С) штатная система масляного охлаждения главного редуктора работает на пределе возможностей, что вызывает деструкцию присадок масла и ускоряет износ подшипников.

Результаты и обсуждения

Для наглядного сопоставления уязвимостей исследуемых воздушных судов составлена матрица распределения и плотности отказов, отражающая специфику эксплуатации АТ в Казахстане.

Направления модернизации системы ТО и Р и повышения надежности АТ в РК

Для снижения уровня аварийности и повышения коэффициента исправности АТ ИАС СВО ВС РК совместно с отечественным оборонно-промышленным комплексом реализует стратегию реформирования системы технического обслуживания [7].

Стратегический контур оптимизации ТО и Р

[Предиктивный анализ] [Локализация ремонта] [Контроль кондиций ГСМ]

- Отказ от календаря АО «АРЗ № 405» (Алматы) Экспресс-лаборатории
- Неразрушающий контроль АО «Тыныс» (Кокшетау) Мониторинг обводнения

1. Внедрение элементов концепции предиктивного обслуживания (CBM – Condition Based Maintenance):

Постепенный отказ от жестких календарных сроков замены агрегатов на Су-30СМ и переход к обслуживанию по фактическому состоянию. Это достигается за счет углубленной автоматизированной расшифровки полетной информации бортовых накопителей (тест-системы объективного контроля) [10].

2. Максимальное вовлечение отечественных ремонтных мощностей:

Капитальный ремонт и модернизация вертолетного парка Ми-8/171 локализованы на базе АО «Авиаремонтный завод № 405» (г. Алматы), что сокращает сроки простоя техники [7].

Изготовление узлов систем жизнеобеспечения и элементов гидросистем передано на АО «Тыныс» (г. Кокшетау), снижая зависимость от импорта запчастей.

3. Совершенствование методов неразрушающего контроля:

Оснащение авиационных баз современными мобильными ультразвуковыми и магнитопорошковыми дефектоскопами для раннего выявления усталостных дефектов в лопатках двигателей МиГ-31 и элементах планера Ми-8 непосредственно в условиях эксплуатации.

Таблица 1.

Сравнительная матрица уязвимости систем воздушных судов СВО ВС РК

Тип ВС	Двигатель и топливная система	БРЭО и автоматика	Гидравлическая система	Планер и элементы конструкции
Су-30СМ	Средняя. Высокие нагрузки на гидроцилиндры сопла УВТ [9].	Высокая. Чувствительность цифровых блоков к перегреву на стоянках [6].	Средняя. Высокое рабочее давление в контурах маневрирования.	Низкая. Современный планер с высоким остаточным ресурсом.
МиГ-31Б	Высокая. Проблемы термической усталости металла лопаток Д-30Ф6 [5].	Средняя. Моральное старение элементной базы советского периода.	Высокая. Утечки АМГ-10 из-за температурных расширений стыков.	Средняя. Усталостные микротрещины силовых шпангоутов.
Ми-8	Высокая. Абразивный износ лопаток песком и пылью [4].	Низкая. Аналоговые дублированные системы с высокой живучестью.	Средняя. Износ уплотнений комбинированных агрегатов управления.	Высокая. Вибрационные трещины хвостовой балки, износ лопастей.

Заключение

Комплексный анализ структуры отказов ВС в Силах воздушной обороны Республики Казахстан демонстрирует прямую зависимость надежности техники от ее технологического поколения и условий эксплуатации.

Для новейших комплексов Су-30СМ главным вектором контроля должна оставаться прецизионная механика УВТ и температурный режим работы вычислительных систем БРЭО.

Для парка МиГ-31Б критически важным является мониторинг скрытых тепловых повреждений силовой установки и замена стареющей проводки.

В армейской авиации на примере Ми-8 ключевые усилия должны быть сосредоточены на защите двигателей от абразивной эрозии и снижении вибрационных нагрузок на планер.

Реализация программ локализации ремонта, внедрение систем предиктивного анализа, и модернизация средств наземного контроля позволят гарантировать бесперебойное выполнение задач по защите воздушного пространства Республики Казахстан.

Список использованных источников:

1. Закон Республики Казахстан «О национальной безопасности Республики Казахстан» от 6 января 2012 года № 527-IV.
2. Правила инженерно-авиационного обеспечения государственной авиации Республики Казахстан. Утверждены приказом Министра обороны РК. Астана, 2017. 184 с.
3. Инструкция по обеспечению безопасности полетов в государственной авиации Республики Казахстан. Астана: Департамент безопасности полетов МО РК, 2019. 96 с.

4. Ахметов, Б. К. Особенности технического обслуживания и ремонта вертолетной техники в условиях высокой запыленности южных регионов Казахстана Б. К. Ахметов, С. С. Нурахметов Вестник Военного института Сил воздушной обороны. Актобе, 2021. № 2 (52). С. 14-21.
5. Данияров, А. М. Анализ повреждаемости элементов конструкции планера и силовых установок самолетов МиГ-31 при длительных сроках эксплуатации А. М. Данияров, Е. А. Смагулов Наука и военная безопасность. Алматы, 2022. № 4. С. 45–51.
6. Жумашев, Т. Р. Оценка надежности цифровых систем дистанционного управления (СДУ) современных многоцелевых истребителей в условиях резко континентального климата Т. Р. Жумашев Известия НАН РК. Серия физико-математическая. Алматы, 2023. Т. 3, № 412. С. 88–95.
7. Кожасбаев, А. А. Локализация оборонно-промышленного комплекса Республики Казахстан: опыт и перспективы АО «Авиаремонтный завод № 405» А. А. Кожасбаев Оборонный заказ и военно-техническое сотрудничество. Астана, 2024. № 1. С. 32–39.
8. Елисеев, Ю. С. Надежность, ресурс и техническая диагностика газотурбинных двигателей Ю. С. Елисеев, В. В. Крымов. М.: Высшая школа, 2018. 342 с.
9. Борисов, И. В. Особенности эксплуатации силовых установок АЛ-31ФП с управляемым вектором тяги И. В. Борисов Авиационная техника и технология. 2020. № 3. С. 27–34.
10. Статистический сборник авиационных инцидентов и отказов авиационной техники в государственной авиации Республики Казахстан за период 2015–2024 гг. Астана: Служба безопасности полетов ВС РК, 2025. 120 с.

ЖАҢА ТЕХНИКАЛЫҚ ҚҰРАЛДАРДЫ ЖАСАУДЫҢ ФИЗИКА-
МАТЕМАТИКАЛЫҚ ӘДІСТЕРІ МЕН МОДЕЛЬДЕРІ

УДК 621.671:629.7

И.С.Бакниязов

Республиканское государственное учреждение войсковая часть 54835,

Республика Казахстан, город Семей

Bakniyazov.ilias.mag@yandex.ru

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ
ГИДРАВЛИЧЕСКОГО НАСОСА НШ-39 НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА
ДАВЛЕНИЯ, РАСХОДА И ВИБРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ

Аңдатпа: Мақалада НШ-39 гидравликалық сорғысының диагностика жүйесін құру әдістемесі қысым, жұмыс сұйықтығының шығыны және корпус дірілінің параметрлерін кешенді талдау негізінде қарастырылған. Зерттеудің өзектілігі тісті доңғалақты сорғы ақауларын ерте анықтау қажеттілігімен түсіндіріледі, себебі берілістің төмендеуі, ішкі ағып кетулердің артуы, кавитация, гидравликалық желінің бітелуі және тісті жұптың тозуы ұқсас пайдалану белгілері арқылы байқалып, техникалық жағдайды қате бағалауға әкелуі мүмкін. Бір ғана параметрді, мысалы тек қысымды немесе тек шығынды бақылау диагностикалық қорытындының жеткілікті дәлдігін қамтамасыз етпейтіні және дамып келе жатқан ақаудың сипатын анықтауға мүмкіндік бермейтіні көрсетілген. Көппараметрлі тәсіл ұсынылады, оған сорғының кірісіндегі және шығысындағы қысымды, жұмыс сұйықтығының шығынын, біліктің айналу жиілігін, дірілдің жалпы деңгейін, діріл жылдамдығын және діріл сигналының спектрлік белгілерін өлшеу кіреді. Диагностика жүйесін құрудың негізгі кезеңдері қарастырылған: бақыланатын параметрлерді таңдау, датчиктерді орналастыру орындарын негіздеу, сигналдарды тіркеу, деректерді сүзу және нормалау, диагностикалық белгілерді есептеу, алынған мәндерді рұқсат етілген шектермен салыстыру және объектінің техникалық жағдайы туралы шешім қабылдау. Ақпараттық критерийлер ретінде салыстырмалы беріліс коэффициенті, қысым мен шығын пульсациясының коэффициенттері, діріл жылдамдығының орташа квадраттық мәні, сипаттамалық жиіліктер амплитудасы және дірілдің спектрлік құрылымының өзгеруі қолданылған. Гидравликалық және діріл параметрлерін бірлесіп талдау сорғының жарамды күйін, тістердің тозуын, ішкі ағып кетулерді, кавитацияны, сорылу шарттарының бұзылуын және гидравликалық желінің бітелуін ажыратуға мүмкіндік беретіні анықталған. Жұмыстың практикалық маңыздылығы ұсынылған әдістемені зертханалық стенд әзірлеуде, пайдалану кезіндегі бақылауда, қалдық жұмысқа қабілеттілікті бағалауда және НШ-39 сорғысының автоматтандырылған диагностика жүйесін құруда қолдану мүмкіндігімен анықталады.

Түйін сөздер: Гидравликалық сорғы, НШ-39, техникалық диагностика, қысым, шығын, діріл, тозу, кавитация, диагностикалық белгілер.

Annotation: The article considers a methodology for developing a diagnostic system for the NSH-39 hydraulic pump based on a comprehensive analysis of pressure, working fluid flow rate, and vibration parameters of the pump housing. The relevance of the study is determined by the need for early detection of gear pump faults, since reduced delivery, increased internal leakage, cavitation, clogging of the hydraulic line, and wear of the gear pair may demonstrate similar operational symptoms and lead to an incorrect assessment of the technical condition. It is shown that monitoring only one parameter, for example only pressure or only flow rate, does not provide sufficient reliability of the diagnostic conclusion and does not make it possible to determine the nature of a developing defect. A multiparameter approach is proposed, which includes measuring pressure at the pump inlet and outlet, working fluid flow rate, shaft rotational speed, overall

vibration level, vibration velocity, and spectral features of the vibration signal. The main stages of developing the diagnostic system are considered: selection of monitored parameters, justification of sensor placement, signal recording, data filtering and normalization, calculation of diagnostic indicators, comparison of the obtained values with permissible limits, and decision-making regarding the technical condition of the object. The relative delivery coefficient, pressure and flow pulsation coefficients, root mean square vibration velocity, amplitudes of characteristic frequencies, and changes in the spectral structure of vibration are used as informative criteria. It has been established that the combined analysis of hydraulic and vibration parameters makes it possible to distinguish between the normal operating condition of the pump, gear wear, internal leakage, cavitation, violation of suction conditions, and clogging of the hydraulic line. The practical significance of the work lies in the possibility of applying the proposed methodology in the development of a laboratory test bench, operational monitoring, assessment of residual operability, and creation of an automated diagnostic system for the NSH-39 pump.

Key words: Hydraulic pump, NSH-39, technical diagnostics, pressure, flow rate, vibration, wear, cavitation, diagnostic features.

Аннотация: В статье рассмотрена методика построения системы диагностики гидравлического насоса НШ-39 на основе комплексного анализа давления, расхода рабочей жидкости и вибрационных параметров корпуса. Актуальность исследования обусловлена необходимостью раннего выявления неисправностей шестерённого насоса, поскольку снижение подачи, рост внутренних утечек, кавитация, засорение гидравлической линии и износ зубчатой пары могут проявляться сходными эксплуатационными признаками и приводить к ошибочной оценке технического состояния. Показано, что контроль одного параметра, например только давления или только расхода, не обеспечивает достаточной достоверности диагностического заключения и не позволяет установить характер развивающегося дефекта. Предложен многопараметрический подход, включающий измерение давления на входе и выходе насоса, расхода рабочей жидкости, частоты вращения вала, общего уровня вибрации, виброскорости и спектральных признаков вибросигнала. Рассмотрены основные этапы построения системы диагностики: выбор контролируемых параметров, обоснование мест размещения датчиков, регистрация сигналов, фильтрация и нормирование данных, расчёт диагностических признаков, сравнение полученных значений с допустимыми пределами и принятие решения о техническом состоянии объекта. В качестве информативных критериев использованы относительный коэффициент подачи, коэффициенты пульсации давления и расхода, среднеквадратическое значение виброскорости, амплитуды характерных частот и изменение спектральной структуры вибрации. Установлено, что совместный анализ гидравлических и вибрационных параметров позволяет различать исправное состояние насоса, износ шестерён, внутренние утечки, кавитацию, нарушение условий всасывания и засорение гидравлической линии. Отмечено, что применение совокупности признаков повышает устойчивость диагностирования при изменении режима работы и снижает вероятность ложной классификации отказов. Практическая значимость работы заключается в возможности применения предложенной методики при разработке лабораторного стенда, проведении эксплуатационного контроля, оценке остаточной работоспособности и создании автоматизированной системы диагностики насоса НШ-39. Разработанная схема может быть адаптирована для насосов близкого типоразмера и использована в учебном процессе при изучении методов технической диагностики гидравлических агрегатов. Представленные диагностические признаки создают основу для последующего внедрения алгоритмов машинного обучения, формирующих заключение по совокупности измеренных данных в условиях стендовых и реальных эксплуатационных испытаний насоса.

Ключевые слова: Гидравлический насос, техническая диагностика, давление, расход, вибрация, износ, кавитация, диагностические признаки.

Введение

Гидравлический насос НШ-39 относится к шестерённым насосам объёмного действия и применяется для подачи рабочей жидкости под давлением в гидравлические системы машин и агрегатов. Работоспособность такого насоса напрямую влияет на устойчивость работы исполнительных механизмов, стабильность давления в системе и безопасность эксплуатации оборудования. При снижении технического состояния насоса ухудшается подача, увеличиваются внутренние утечки, возрастает уровень шума и вибрации, появляются пульсации давления, а также повышается вероятность отказа сопряжённых элементов гидросистемы [1].

Особенностью шестерённых насосов является то, что процесс нагнетания рабочей жидкости сопровождается периодическим изменением объёма рабочих камер. Поэтому даже при исправном состоянии в системе присутствуют определённые пульсации давления и расхода. Однако при износе зубьев, увеличении зазоров, нарушении герметичности, подсосе воздуха или загрязнении рабочей жидкости характер этих пульсаций изменяется. Следовательно, изменение формы сигнала давления, расхода и вибрации может рассматриваться как диагностический признак технического состояния насоса [2].

На практике состояние насоса часто оценивают по отдельным показателям: давлению на выходе, подаче, шуму или внешним признакам течи. Такой подход удобен, но не всегда даёт точный результат. Например, падение расхода может быть вызвано как износом рабочих поверхностей, так и засорением фильтра или изменением вязкости рабочей жидкости. Повышение вибрации может быть следствием износа подшипников, нарушения центровки, кавитации или повреждения зубчатой пары. Поэтому для более точной диагностики необходимо использовать совокупность параметров.

Целью исследования является разработка методики построения системы диагностики гидравлического насоса НШ-39 на основе совместного анализа давления, расхода и вибрационных параметров. Для достижения цели необходимо определить состав контролируемых параметров, предложить схему размещения датчиков, описать алгоритм обработки диагностических сигналов, выделить основные признаки характерных неисправностей и сформировать порядок принятия диагностического решения.

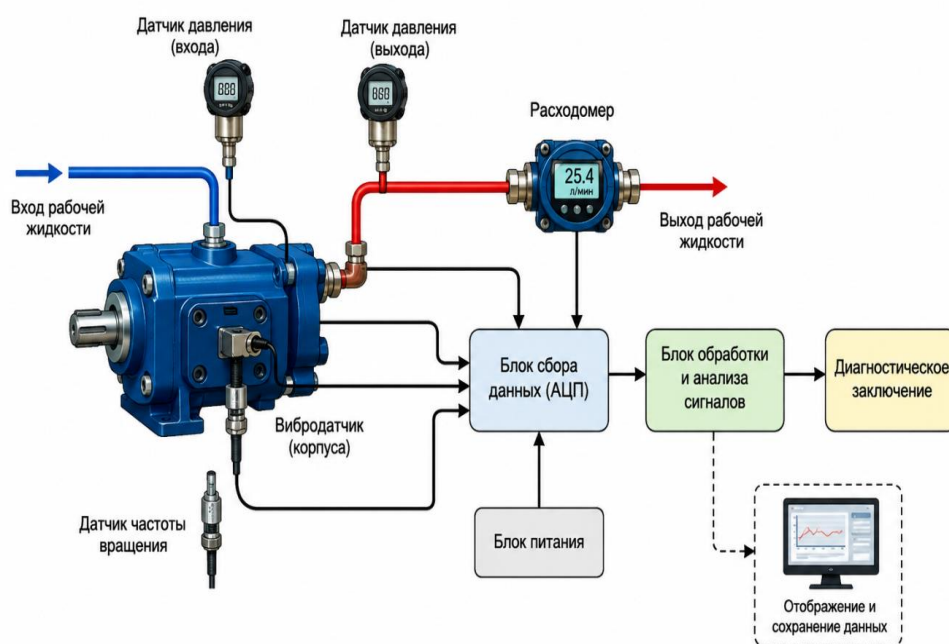


Рисунок 1. Структурная схема системы диагностики насоса НШ-39.

Метод исследования

Объектом исследования является гидравлический насос НШ-39, работающий в составе гидравлической системы. В качестве контролируемых параметров выбраны давление на входе насоса, давление на выходе насоса, расход рабочей жидкости, частота вращения вала и вибрация корпуса. Такой набор параметров позволяет одновременно оценивать гидравлическую эффективность, устойчивость потока и механическое состояние насоса.

Диагностическая система должна включать следующие измерительные каналы: датчик давления на всасывающей линии, датчик давления на напорной линии, расходомер на выходе насоса, датчик частоты вращения и один или два вибродатчика, установленных на корпусе. Датчики давления целесообразно размещать как можно ближе к входному и выходному патрубкам для уменьшения влияния потерь и пульсаций в трубопроводах. Вибродатчик рекомендуется устанавливать на жёстком участке корпуса вблизи приводного вала или зоны опор, поскольку в этих местах наиболее заметно проявляются механические дефекты [3].

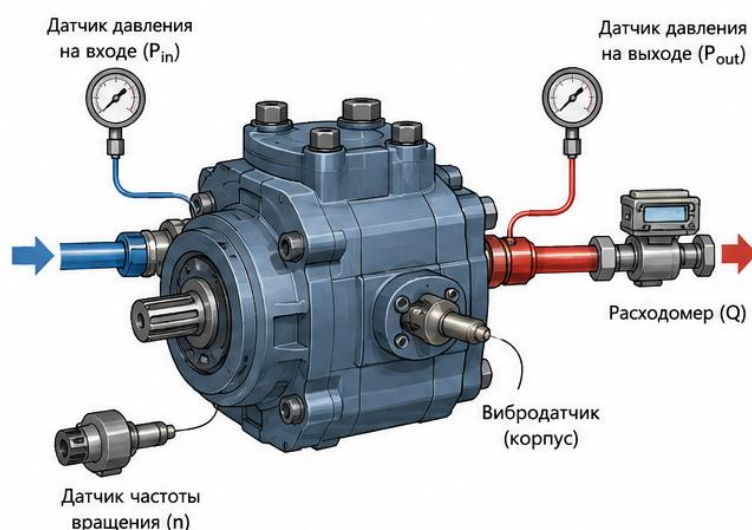


Рисунок 2. Схема размещения датчиков на гидравлическом насосе НШ-39.

Обобщённая схема диагностирования может быть представлена следующим образом: насос НШ-39 работает в заданном режиме; датчики фиксируют давление, расход, вибрацию и частоту вращения; сигналы поступают в блок сбора данных; после фильтрации и обработки рассчитываются диагностические признаки; полученные значения сравниваются с допустимыми пределами или эталонной базой исправного насоса; система формирует заключение о состоянии объекта.

Для оценки изменения подачи используется относительный коэффициент подачи:

$$K_Q = \left(\frac{Q_i}{Q_{ref}} \right) \cdot \left(\frac{n_{ref}}{n_i} \right), \quad (1)$$

где Q_i — измеренный расход в текущем режиме; Q_{ref} — эталонный расход исправного насоса; n_i — текущая частота вращения; n_{ref} — эталонная частота вращения. Если значение K_Q уменьшается, это указывает на снижение производительности насоса. Причинами могут быть износ рабочих поверхностей, увеличение внутренних утечек, потеря герметичности или ухудшение условий всасывания.

Для оценки неравномерности давления и расхода используются коэффициенты пульсации:

$$k_p = \frac{\sigma_p}{\bar{p}}; \quad k_q = \frac{\sigma_q}{\bar{q}}, \quad (2)$$

где σ_p и σ_q — среднеквадратические отклонения давления и расхода; $\bar{p}$ и $\bar{q}$ — средние значения давления и расхода. Рост коэффициента пульсации давления может указывать на нестабильность процесса нагнетания, кавитацию, подсос воздуха или повреждение зубчатой пары. Рост коэффициента пульсации расхода может быть связан с внутренними утечками или нарушением работы всасывающей линии.

Для анализа вибрации используется среднеквадратическое значение виброскорости или виброускорения:

$$V_{RMS} = \sqrt{\left(\frac{1}{N}\right) \cdot \sum v_i^2}, \quad (3)$$

где v_i — мгновенное значение виброскорости; N — число отсчётов сигнала. Дополнительно могут использоваться спектральные признаки: амплитуда на частоте вращения, амплитуда на частоте зацепления, наличие боковых полос и уровень высокочастотной энергии. Для шестерённого насоса особенно важны частоты, связанные с вращением вала и прохождением зубьев через зону зацепления [4].

Методика построения системы диагностики включает пять этапов. На первом этапе исправный насос испытывается на нескольких частотах вращения и нагрузках, что позволяет сформировать эталонную базу. На втором этапе регистрируются текущие параметры насоса в процессе эксплуатации или стендовой проверки. На третьем этапе выполняется предварительная обработка сигналов: фильтрация, удаление выбросов, коррекция нулевых значений и синхронизация данных. На четвёртом этапе рассчитываются диагностические признаки. На пятом этапе выполняется сравнение признаков с пороговыми значениями и принимается решение о техническом состоянии насоса.

Таблица 1

Диагностические признаки и возможные причины неисправностей насоса НШ-39

Диагностический признак	Возможная причина
Снижение расхода при снижении давления	Внутренние утечки; износ рабочих зазоров
Снижение расхода при росте давления	Засорение фильтра; повышенное сопротивление линии
Рост пульсаций давления	Кавитация; подсос воздуха; нестабильная работа
Рост вибрации без значительного снижения подачи	Механический износ; повреждение зубьев
Рост вибрации и высокочастотной энергии	Кавитация; ударные процессы
Рост вибрации и снижение подачи	Износ шестерён; увеличение зазоров

Результаты и обсуждения

В результате проведённого анализа предложена структура системы диагностики насоса НШ-39, включающая гидравлический и вибрационный контуры контроля. Гидравлический контур оценивает способность насоса создавать требуемое давление и обеспечивать необходимую подачу рабочей жидкости. Вибрационный контур позволяет выявлять механические дефекты, износ зубчатой пары, нарушение равномерности зацепления и кавитационные процессы.

Для проверки работоспособности методики рассмотрены типовые состояния насоса: исправное состояние, износ шестерён, внутренние утечки, кавитация и засорение гидравлической линии. Каждое состояние имеет собственную совокупность диагностических признаков. Анализ показывает, что по одному параметру не всегда можно достоверно определить тип неисправности. Например, снижение расхода наблюдается и

при износе, и при утечках, и при засорении линии. Однако при износе одновременно возрастает вибрация, при утечках обычно снижается давление, а при засорении линии возможно повышение давления перед участком сопротивления [5].

Для практической реализации системы диагностики предложены три уровня оценки состояния насоса. Первый уровень — «норма»: давление, расход и вибрация находятся в пределах эталонных значений, насос может продолжать эксплуатацию без дополнительных мероприятий. Второй уровень — «предупреждение»: фиксируются начальные отклонения, например незначительное снижение подачи, рост пульсаций давления или умеренное увеличение вибрации.

Таблица 2

Типовые состояния насоса и диагностические признаки

Состояние насоса	Давление	Расход	Вибрация	Диагностический вывод
Исправное состояние	Стабильное	Соответствует норме	Низкая	Насос работоспособен
Износ шестерён	Незначительно снижается	Снижается	Возрастает	Увеличение зазоров и ухудшение зацепления
Внутренние утечки	Снижается	Снижается	Умеренно возрастает	Потеря герметичности рабочих полостей
Кавитация	Нестабильное	Неравномерный	Резко возрастает	Нарушение условий всасывания
Засорение линии	Может повышаться	Снижается	Умеренно возрастает	Повышение гидравлического сопротивления

Третий уровень — «аварийное состояние»: наблюдается значительное снижение расхода, нестабильное давление, резкий рост вибрации, выраженные пульсации или признаки кавитации. В этом случае эксплуатацию насоса следует ограничить и провести стендовую проверку или ремонт.

Предлагаемые ориентировочные критерии должны уточняться после накопления реальных экспериментальных данных по конкретному насосу. В качестве предварительных границ можно использовать относительное сравнение с исправным эталоном, так как абсолютные значения вибрации и пульсации зависят от режима работы, частоты вращения, температуры и вязкости рабочей жидкости [6].

Таблица 3

Ориентировочные пороговые значения диагностических признаков

Параметр	Предупреждение	Аварийное состояние
Снижение относительной подачи	8–10 %	более 12–15 %
Рост пульсации давления	5–7 %	более 8 %
Рост пульсации расхода	5–7 %	более 8 %
Рост уровня вибрации	+40–60 %	более +80 %
Высокочастотные составляющие	умеренные	выраженные
Нестабильность давления	периодическая	постоянная



Рисунок 3. Алгоритм принятия диагностического решения.

На основании полученных результатов сформирован алгоритм работы диагностической системы. Сначала система проверяет корректность измерений: наличие сигнала, отсутствие обрыва датчиков, соответствие частоты вращения заданному режиму. Затем рассчитываются средние значения давления и расхода, определяется относительное снижение подачи и коэффициенты пульсации. После этого анализируется вибрационный сигнал: общий уровень вибрации, наличие выраженных частотных составляющих и высокочастотных всплесков. После сопоставления всех признаков система присваивает насосу одно из состояний: исправен, требуется наблюдение, требуется техническое обслуживание или требуется ремонт.

Основной результат исследования состоит в том, что предложенная методика позволяет перейти от простой проверки давления к комплексной оценке технического состояния насоса. Это особенно важно для НШ-39, так как его неисправности могут проявляться не только в падении давления, но и в изменении характера расхода, росте пульсаций и появлении вибрации. Совместное использование нескольких диагностических каналов повышает достоверность оценки и позволяет выявлять дефекты на более ранней стадии.

Заключение

Разработанная методика построения системы диагностики гидравлического насоса НШ-39 основана на совместном анализе давления, расхода и вибрационных параметров. Такой подход позволяет учитывать как гидравлические, так и механические признаки неисправностей.

Предложено использовать датчики давления на входе и выходе насоса, расходомер, датчик частоты вращения и вибродатчики корпуса. В качестве диагностических признаков выбраны относительный коэффициент подачи, коэффициенты пульсации давления и расхода, среднеквадратический уровень вибрации и спектральные признаки вибрационного сигнала.

Установлено, что снижение расхода само по себе не позволяет однозначно определить причину неисправности. Для уточнения диагноза необходимо сопоставлять его с изменением давления и вибрации. При износе шестерён наблюдается снижение подачи и рост вибрации; при внутренних утечках — падение давления и расхода; при кавитации — резкие пульсации давления и высокочастотная вибрация; при засорении линии — снижение расхода при возможном росте давления.

Практическая значимость предложенной методики заключается в возможности её применения при разработке диагностического стенда или эксплуатационной системы контроля технического состояния насоса НШ-39. Для дальнейшего развития работы необходимо провести экспериментальные испытания исправных и дефектных насосов, уточнить пороговые значения диагностических признаков и сформировать базу данных типовых неисправностей.

Список использованных источников

1. Руководство по эксплуатации и ремонту гидравлического насоса НШ-39М. – 48 с.
2. Башта Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. – М.: Машиностроение, 1982. – 423 с.
3. ГОСТ ISO 13373-1-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 1. Общие методы.
4. ISO 4406:2021. Hydraulic fluid power — Fluids — Method for coding the level of contamination by solid particles.
5. ГОСТ 17108-86. Насосы объемные. Методы испытаний.
6. Фаскиев Р.С. Гидроприводы и гидромашины: учебное пособие. – Оренбург: ОГУ, 2019. – 146 с.

Әуе қорғанысы күштері Әскери институтының
ХАБАРШЫСЫ
Ғылыми журналы

Редакцияның мекен жайы: Ақтөбе қаласы, Астана ауданы,
Ә.Молдағұлова даңғылы, 39
Жұмыс тел: 8(7132) 972221, ішкі тел: 61194.
e-mail: conf-visvo@yandex.kz

Басуға қол қойылған күні **2025 ж.08.01.**
Пішімі 60x84 $\frac{1}{16}$ Көлемі 6,38 баспа табағы
Таралымы 300 дана

ӘҚК Әскери институт баспаханасында
Дайын оригинал-макеттен басылған
Ақтөбе қаласы, Ә.Молдағұлова даңғылы, 39