

УДК 621.396.96

DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-4-46-62

Концепция автоматизированной системы управления поддержанием летной годности с элементами искусственного интеллекта

С.С. Подосенов¹, О.Г. Феоктистова²

¹ «ОС-Технолоджи», г. Москва, Россия

² Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия

Аннотация: В статье представлена концепция автоматизированной системы управления поддержанием летной годности (АСУ ПЛГ), интегрирующей элементы искусственного интеллекта. Цель исследования – разработка архитектурного подхода, обеспечивающего сквозную обработку эксплуатационных данных (телеметрия, ERP, OEM) для формирования обоснованных рекомендаций по техническому обслуживанию при сохранении ключевой роли и ответственности инженерного персонала. В основе методологии лежит принцип многоуровневой архитектуры, включающей слой сбора гетерогенных данных, аналитическое ядро на основе ансамбля моделей (LSTM-сети, анализ выживаемости по Коксу, распределение Вейбулла) и слой поддержки решений с обязательным контролем со стороны человека через механизм Human Verification Gateway. В результате предложена концепция системы, направленная на реализацию предиктивной аналитики для оценки риска отказов критических компонентов и оптимизации графиков технического обслуживания методами целочисленного программирования. Ключевым принципом является подчиненная роль ИИ, выступающего в качестве инструмента анализа, а не автономного лица, принимающего решения, что соответствует требованиям нормативной базы. Основной вывод заключается в том, что предложенный концептуальный подход создает теоретическую основу для перехода от регламентного к предиктивно-оптимизационному обслуживанию, потенциально способствуя повышению эксплуатационной готовности воздушных судов за счет проактивного планирования работ. Концепция предусматривает интеграцию с цифровыми двойниками и нормативной документацией, формируя ориентир для развития сервисно ориентированных моделей технического обслуживания в авиации.

Ключевые слова: поддержание летной годности, искусственный интеллект, предиктивное техническое обслуживание, анализ выживаемости, распределение Вейбулла, цифровой двойник, оптимизация ресурсов, авиационная безопасность.

Для цитирования: Подосенов С.С., Феоктистова О.Г. Концепция автоматизированной системы управления поддержанием летной годности с элементами искусственного интеллекта // Научный вестник МГТУ ГА. 2026. Т. 29, № 4. С. 46–62. DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-4-46-62

The concept of an automated airworthiness management system with elements of artificial intelligence

S.S. Podosenov¹, O.G. Feoktistova²

¹ OS-TECH, Moscow, Russia

² Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

Abstract: This article presents a concept for an automated airworthiness management system (AAMXS) that integrates elements of artificial intelligence (AI). The aim of this work is to develop an architectural approach that ensures end-to-end processing of operational data (telemetry, ERP, OEM) to formulate well-founded recommendations for maintenance while maintaining the key role and responsibility of engineering personnel. The methodology is based on the multi-level architecture principle, that includes a heterogeneous data collection layer, an analytical core based on the ensemble of models (LSTM networks, Cox survival analysis, Weibull distribution), and a decision support layer with mandatory human control through the Human Verification Gateway mechanism. As a result, a system concept is proposed, aimed at implementing predictive analytics to assess the risk of critical

component failures and to optimize maintenance schedules using integer programming methods. The key principle is the subordinate role of AI, acting as an analysis tool rather than an autonomous decision-maker, which meets the requirements of the regulatory framework. The main conclusion is that the proposed conceptual approach creates a theoretical basis for the transition from scheduled to predictive-optimized maintenance, potentially contributing to improving aircraft operational readiness through proactive work planning. The concept provides for integration with digital twins and regulatory documentation, forming a guideline for the development of service-oriented maintenance models in aviation.

Keywords: continued airworthiness, artificial intelligence, predictive maintenance, survivability analysis, Weibull distribution, digital twin, resource optimization, aviation safety.

For citation: Podosenov, S.S., Feoktistova, O.G. (2026). The concept of an automated airworthiness management system with elements of artificial intelligence. Civil Aviation High Technologies, vol. 29, no. 4, pp. 46–62. DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-4-46-62

Введение

Среди динамических систем, в которых для повышения эффективности управления может быть использован прогноз, значительное место занимают системы обслуживания сложных технических объектов [1, 2]. Примером такого объекта является как воздушное судно в целом, так и его функциональные системы и их изделия в частности, туда же можно отнести и систему для поддержания летной годности с элементами искусственного интеллекта.

Концепция системы основана на принципах, изложенных в работе Ю.М. Чинючина [3], где представлена «пирамида летной годности», включающая три основных участника системы поддержания летной годности: разработчика (ОКБ), изготовителя и эксплуатанта. В данной системе этот принцип реализован через интеграцию данных от всех участников: нормативно-технической документации от разработчиков, данных о производстве от изготовителей и эксплуатационной информации от авиакомпаний.

Настоящая концепция опирается на современные методологические подходы к поддержанию летной годности, в которых ключевое значение придается эксплуатационной фазе жизненного цикла воздушных судов (ВС) [4]. Согласно существующим исследованиям, до 65 % всего жизненного цикла ВС приходится именно на эксплуатацию [5]. Это обуславливает принципиальную важность создания инструментов, ориентированных на мониторинг технического состояния и управление им в реальных эксплуатационных

условиях, что и является одной из центральных задач предлагаемой концепции автоматизированной системы управления поддержанием летной годности (АСУ ПЛГ).

Особую актуальность разработке придает проблема отсутствия механизма, способного контролировать выполнение требований поддержания летной годности ВС и обеспечения безопасности полетов, заложенных в авиационных правилах [5]. Предлагаемая АСУ ПЛГ реализует именно такой механизм непрерывного мониторинга и поддержки летной годности.

Концептуально АСУ ПЛГ представляет собой систему, целью которой является переход от реактивного (регламентного) технического обслуживания (ТО) к предиктивно-оптимизационному. Для достижения этой цели предполагается использование следующих основных компонентов:

- сбор и консолидация данных из гетерогенных источников (телеметрия, ERP, OEM, реестры регуляторов, результаты осмотров);
- аналитическое ядро на основе ансамбля моделей (LSTM-сети для временных рядов, анализ выживаемости по Коксу для индивидуального прогноза риска, распределение Вейбулла для оценки базовой надежности компонентов);
- модуль оптимизации на основе целочисленного программирования для формирования графиков ТО с учетом ресурсных ограничений;
- обязательная верификация всех рекомендаций инженером через механизм Human Verification Gateway, что обеспечивает соот-

ветствие нормативным требованиям и сохраняет ответственность персонала.

Методы и методология

Предлагаемая концепция автоматизированной системы управления поддержанием летной годности основывается на принципе сквозной обработки информации – от сбора первичных данных до формирования обоснованных рекомендаций для инженерно-технического персонала. Ключевой методологической основой концепции является предлагаемая многоуровневая архитектура (рис. 1), которая должна обеспечить интеграцию разнородных данных и комплексную аналитику при безусловном приоритете человеческого контроля над всеми управляющими решениями.

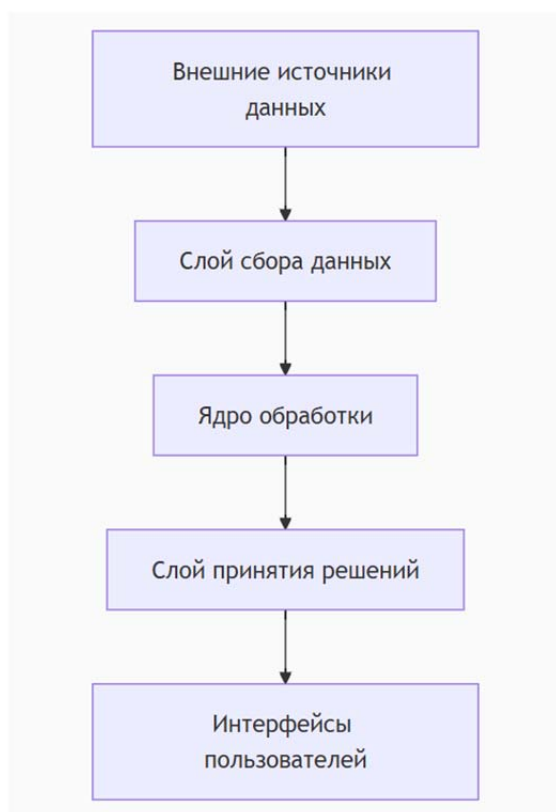


Рис. 1. Многоуровневая архитектура
Fig. 1. Multi-level architecture

В основе предложенной архитектуры лежат принципы многоуровневых экспертных систем [6], предполагающие разделение по-

верхностных знаний (правила диагностики и рекомендации) и глубинных знаний (прогнозные модели и алгоритмы). Такое разделение обеспечивает гибкость и интерпретируемость решений, что полностью соответствует заложенному в концепцию взаимодействию модуля прогнозирования и рекомендательной системы.

Фундаментом для предиктивных оценок служит совокупность данных из источников – бортовых систем, ERP, OEM, реестров регуляторов (ФАВТ), а также данных ручного ввода (осмотры, NDT). Это позволяет создать единую информационную среду и преодолеть фрагментацию данных [5]. Согласно концепции аналитическое ядро должно отвечать за обработку данных и генерацию предиктивных оценок. Предполагаемый состав ключевых модулей и их целевые функции представлены в табл. 1, а детальный разбор ключевых из них, таких как модель прогнозирования отказов на основе анализа выживаемости, приводится в табл. 2.

Модуль прогнозирования отказов использует ансамбли моделей для повышения точности оценок. Например, для двигателя ПС-90А применяется комбинация LSTM-сетей для анализа временных рядов параметров (температура газов EGT, уровень вибрации), анализа выживаемости для оценки остаточного ресурса с учетом цензурированных данных и физически информированных моделей (Physics-Informed ML), корректирующих прогнозы на основе фундаментальных термодинамических закономерностей.

Для иллюстрации принципов работы, заложенных в концепцию, рассмотрим гипотетический сценарий. Предположим, что в ходе мониторинга параметров гидросистемы Boeing 737 выявляется устойчивый рост температуры гидрожидкости в сочетании с увеличением времени наполнения гидроаккумулятора – признаки, характерные для снижения производительности гидронасоса. В рамках концепции предполагается, что система могла бы выполнить такую последовательность анализа: провести сравнение симптомов с базой исторических инцидентов (например, используя метод FTA), осуще-

Таблица 1
Table 1

Ключевые модули аналитического ядра системы и их функции
The key modules of the system analytical core and their functions

Модуль	Технологии	Выходные данные
Предобработки данных	Apache Spark, Python Pandas	Очищенные временные ряды
Прогнозирования отказов	LSTM-сети, Prophet, Survival Analysis	Риск-оценка компонентов (Failure Probability Index)
Оптимизации ресурсов	Линейное программирование (PuLP), генетические алгоритмы	Графики ТО с учетом приоритетов
Цифровой двойник	ANSYS Twin Builder, Unity3D	3D-модель ВС с маркерами износа

свить автоматическую проверку на соответствие актуальным нормативным требованиям (таким как директива EASA 2023-012R13) и на этой основе сформировать структурированную рекомендацию для инженера. Примером такой рекомендации могла бы служить запись: «Рекомендуется рассмотреть замену гидронасоса в течение 50 циклов. Возможная альтернатива: деталь P/N 65-1234 (аналог OEM)». Данный сценарий иллюстрирует, как концепция предусматривает не только диагностику проблемы, но и поддержку принятия решения с учетом операционной логики и нормативной базы.

На рис. 2 представлена UML-диаграмма компонентов системы, демонстрирующая:

- взаимодействие между Data Acquisition Layer и Core Engine через Apache Kafka;
- использование Kubernetes для оркестрации микросервисов в Core Engine;
- механизм одобрения решений (Human Verification Gateway) в Decision Support Layer;
- интеграцию с внешними системами через REST API.

Взаимодействие персонала с системой осуществляется через специализированный

интерфейсный слой. Его ключевым элементом является веб-дашборд, предоставляющий инженерно-техническим сотрудникам не только наглядную визуализацию состояния парка ВС, но и инструменты для управления процессом ТО. Веб-дашборд обеспечивает визуализацию состояния парка ВС (включая цветовую маркировку износа на интерактивных схемах), утверждение (отклонение) рекомендаций, ручную корректировку планов и обратную связь. Система оповещений формирует push-уведомления при критических событиях, а REST API интегрирует дашборд с ERP и другими корпоративными системами.

Обеспечение безопасности и аудита функционирования системы базируется на строгой ролевой модели контроля доступа (RBAC), которая разграничивает права и зоны ответственности между техником, инженером, начальником ТО и представителем регулятора. В рамках модели техник получает на дашборде цифровые задания (рабочие карты), подтверждает выполнение операций ТО и вносит данные первичных осмотров. Инженер верифицирует рекомендации системы, анализирует отчеты и санкционирует сложные работы. Начальник ТО утверждает

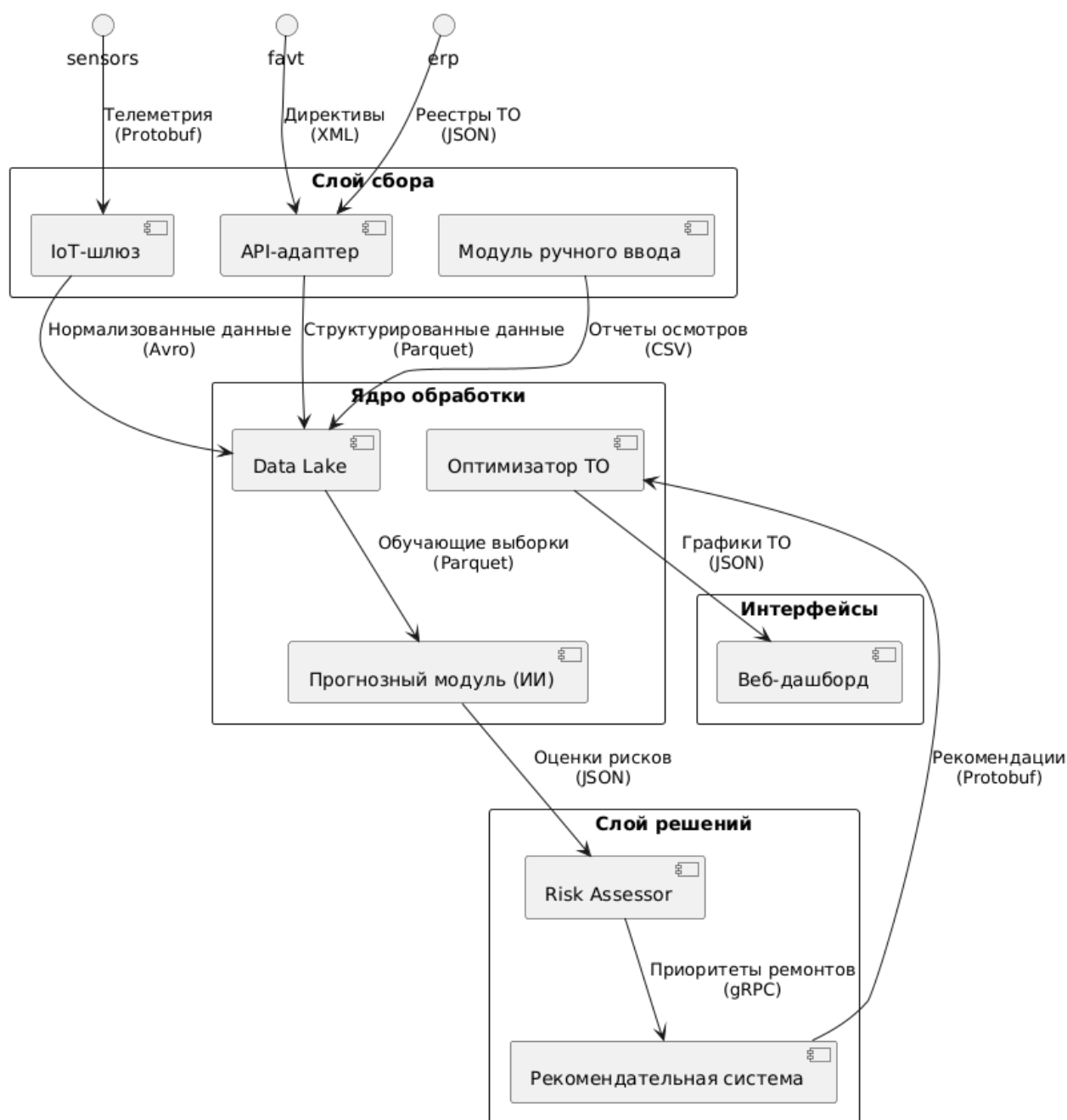


Рис. 2. Uml-диаграмма потоков данных между модулями
Fig. 2. Uml diagram of data flows between the modules

планы и распределяет ресурсы, а представитель регулятора имеет доступ к журналу аудита для контроля. Все действия пользователей в системе подлежат обязательному протоколированию в защищенном журнале изменений, что гарантирует полную прослеживаемость любых операций и соответствует требованиям к документарному сопровожде-

нию процессов поддержания летной годности¹ [7].

¹ Приказ Минтранса РФ № 246 от 13 августа 2015 г. «Об утверждении Федеральных авиационных правил “Требования к юридическим лицам, индивидуальным предпринимателям, осуществляющим коммерческие воздушные перевозки. Форма и порядок выдачи документа, подтверждающего соответствие

Таблица 2
Table 2

Классификация математических моделей в АСУ ПЛГ ВС
The classification of mathematical models in the Automated Control System

Тип задачи	Математическая модель	Применение
Прогнозирование отказов	Survival Analysis, Распределение Вейбулла	Критические узлы (двигатели, шасси)
Оптимизация ТО	Целочисленное программирование	Планирование ангарных работ
Оценка остаточного ресурса	Регрессионные модели	Композитные конструкции
Анализ рисков	Байесовские сети	Системы управления полетом

Предложенная архитектура комплексно решает ключевые операционные проблемы: преодолевает фрагментацию данных за счет создания единой информационной среды, воплощает современные принципы предиктивного ресурсного мониторинга и, что критически важно, через принцип «Сертификационность при проектировании» изначально соответствует строгим требованиям ИКАО и национальных регуляторов.

Для решения ключевых задач предиктивного обслуживания в системе реализован комплекс взаимодополняющих математических моделей, классификация которых по типам решаемых задач, применяемому аппарату и областям применения приведена в табл. 2.

**Модель прогнозирования отказов
на основе анализа выживаемости
(Survival Analysis)**

Модель оценивает вероятность безотказной работы компонентов ВС в зависимости от времени и условий эксплуатации. Основана на регрессии Кокса – полупараметрическом методе, учитывающем влияние ковариат на функцию риска [8].

Применение анализа выживаемости в системе поддержания летной годности требует учета специфики авиационных данных, которые часто содержат цензурированные наблюдения. Наиболее распространенным является правое цензурирование, при котором известно время выхода из исследования до наступления определенного события. В контексте авиационной эксплуатации это соответствует случаям, когда компонент ВС снимается с эксплуатации по плановому ремонту или модернизации до наступления отказа.

Модели выживаемости учитывают две целевые переменные: время события T и флаг цензурирования δ , а также вектор признаков X наблюдения при входе в исследование. Это

юридических лиц, индивидуальных предпринимателей, осуществляющих коммерческие воздушные перевозки, требованиям федеральных авиационных правил» [Электронный ресурс] // Консультант-Плюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_187361/ (дата обращения: 12.11.2025).

делает модели выживаемости более гибкими и точными по сравнению с другими статистическими методами. В разрабатываемой системе данный подход реализован через учет как терминальных событий (фактические отказы), так и цензурированных наблюдений (плановые замены, вывод из эксплуатации) [9]. Математически модель описывается следующей формулой, определяющей опасность отказа в момент времени t при заданных ковариатах X :

$$\lambda(t|X) = \lambda_0(t) \exp(\beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p), \quad (1)$$

где $\lambda(t|X)$ – опасность отказа в момент времени t ;

$\lambda_0(t)$ – базовая функция риска;

β_i – коэффициенты влияния ковариат;

x_i – ковариаты (наработка, температура, вибрация и т. д.).

$$\begin{aligned} x^1: & \text{накопленная циклическая наработка [циклы взлет-посадка];} \\ x^2: & \text{интеграл термических напряжений [}(T_{\text{gas}} - 650^\circ\text{C})^2 dt, ^\circ\text{C}^2 \cdot \text{ч;} \\ x^3: & \text{RMS вибрации [500–2 000 Гц], мм/с;} \\ x^4: & \text{тренд металлосождения масла, ppm/100ч.} \end{aligned} \quad (2)$$

Для демонстрации работы модели выполнен расчет для конкретного экземпляра двигателя со следующими параметрами:

$$x^1 = 1\,800; x^2 = 2,7 \cdot 10^6; x^3 = 4,8; x^4 = 3,2. \quad (3)$$

На основе исторических данных эксплуатации парка двигателей были определены коэффициенты регрессии Кокса, отражающие вклад каждого параметра в общий риск:

$$\begin{aligned} \text{Коэффициенты: } \beta_1 &= 0,021, \beta_2 = 0,18, \beta_3 = 1,75, \beta_4 = 0,93; \\ S &= \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 = 0,021 \cdot 1800 + 0,18 \cdot 2,7 + 1,75 \cdot 4,8 + 0,93 \cdot 3,2. \end{aligned} \quad (4)$$

Данные получены на основе агрегированных данных из открытых источников, технической документации (ОЕМ) и экспертных оценок инженеров-эксплуатационщиков. В процессе промышленной эксплуатации АСУ ПЛГ эти коэффициенты будут автоматически калиброваться на основе реальных данных мониторинга парка двигателей, обеспечивая переход от экспертной к статистически достоверной модели.

Результаты

Для иллюстрации принципов работы, заложенных в концепцию, рассмотрим гипотетический пример применения модели прогнозирования отказов на основе регрессии Кокса. В качестве объекта для демонстрации выбран авиационный двигатель ПД-14, что обусловлено его критической важностью, сложностью конструкции и высокими требованиями к надежности. Данный пример призван показать, как предложенный в концепции подход мог бы переводить абстрактные вероятности в структурированные рекомендации для службы технического обслуживания.

В соответствии с концепцией для построения прогнозной оценки могут быть выделены ключевые ковариаты, оказывающие влияние на ресурс двигателя. В качестве примера таких ковариат можно рассмотреть:

Далее вычисляется экспонента линейного предиктора и итоговая опасность отказа.

Вычисляем экспоненту:

$$e^S = e^{5,12} \quad k \quad (5)$$

Умножаем базовый риск:

$$\lambda(t|X) = 0,0005 \cdot e^{5,12} \approx 0,084 \text{ отказов в час.} \quad (6)$$

На основе проведенного расчета система автоматически выполняет определенный набор действий. Пороговые значения для классификации рисков (например, $> 0,05$ отказов в час для статуса «Высокий риск») являются настраиваемыми параметрами системы. В рамках концепта они устанавливаются на основе анализа «стоимость – риск» – баланса между вероятностью пропущенного отказа (безопасность) и частотой ложных срабатываний (экономические потери от необоснованного простоя). Это позволит перейти от абстрактных расчетных показателей к конкретным управляющим воздействиям в процессе технического обслуживания.

Разработанная в системе модель прогнозирования отказов на основе анализа выживаемости соответствует рекомендациям по использованию статистических методов для прогнозирования надежности или технического состояния обслуживаемых объектов как величины, подлежащей регулированию [10]. Как отмечено в работе, «задача предсказания будущего состояния объекта по известному прошлому и настоящему является задачей вероятностно-статистического характера», что полностью соответствует подходу, реализованному в системе.

Для эффективного планирования ресурсов авиационного предприятия в системе реализована модель оптимизации технического обслуживания, основанная на методах целочисленного программирования [11]. Данная модель формализует задачу минимизации экономических потерь от простоя воздушных судов при соблюдении ограничений по доступным ресурсам: производственным мощностям ангаров и наличию запчастей. Математическая постановка задачи оптимизации графика технического обслуживания (ТО) формулируется как задача целочисленного линейного программирования и может быть представлена в виде (7)

$$\begin{aligned} \min \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^T c_{it} x_{it}; \\ \text{s.t. } \sum_{t=1}^T x_{it} = 1 \text{ для всех } i \in 1, \dots, m; \\ \sum_{i=1}^m a_{ik} x_{it} \leq b_{kt} \text{ для всех } k \in 1, \dots, K, \forall t; \end{aligned}$$

$$x_{it} \in 0, 1. \quad (7)$$

Индексы: i – воздушное судно; t – период времени в плановом горизонте; k – тип ограниченного ресурса, например рабочее место в ангаре определенного типа или конкретная запчасть.

Переменная решения: x_{it} – бинарная переменная, равная 1, если ВС i назначается на проведение ТО в период t , и 0 в противном случае.

Параметры: c_{it} – экономические потери (стоимость простоя), связанные с выводом ВС i на ТО в период t ; a_{ik} – объем потребления ресурса k (например, человеко-часы, количество единиц запчастей) для обслуживания ВС i ; b_{kt} – доступный объем ресурса k в период t .

Целевая функция минимизирует совокупные экономические потери от простоев всего парка ВС за плановый период. Первое ограничение гарантирует, что каждое воздушное судно будет обслужено ровно один раз в течение горизонта планирования. Второе ограничение – ограничение по ресурсам – обеспечивает то, что суммарная потребность всех ВС, назначенных на обслуживание в период t , по каждому ресурсу k не превышает его доступного объема в этот период.

Критически важными для практической реализации модели оптимизации являются два типа ограничений: производственные мощности и наличие запчастей.

Во-первых, модель учитывает физические ограничения инфраструктуры, а именно производственные мощности ангаров. Математически это выражается ограничением, которое включает количество рабочих мест, их специализацию по типам ВС и график доступности:

$$\sum_{i \in I_v} x \leq C_{at}^v \text{ для всех } a \in A, t \in T, v \in V, \quad (8)$$

где x – бинарная переменная (1, если ВС i обслуживается в период t);

C_{at}^v – вместимость ангара a для типа v в период t ;

I_v – множество ВС типа v .

Во-вторых, существенным фактором является наличие запчастей. Учет лимитиро-

ванных ресурсов запасных частей реализован через балансовое уравнение

$$I_{pt} = I_{pt-1} + S_{pt} - \sum_{i \in I} d_{ip} \cdot x_i \text{ для всех } p \in P, t \in T, \quad (9)$$

где I_{pt} – запас детали p в конце периода t ;
 S_{pt} – поставка детали p в период t ;
 d_{ip} – потребность ВС i в детали p ;
 I_{pt-1} – начальный запас детали p ;
 x_i – бинарная переменная (1, если ВС i обслуживается в период t).

В рамках концепции данная оптимизационная модель служит формальным аппаратом для выражения задачи планирования ТО. Она задает структуру целевой функции (минимизация потерь) и ограничений (ресурсы, запчасти), демонстрируя, как принципы оптимального планирования могут быть интегрированы в систему поддержки принятия решений.

Концепцией предполагается, что на каждом цикле планирования решатель, реализующий методы целочисленного программирования (например, на базе симплекс-метода и метода ветвей и границ), мог бы использоваться для нахождения расписания x_{it} , минимизирующего суммарные потери при заданных ограничениях.

Такой подход позволяет перейти от реактивного планирования «по фактическому состоянию» к проактивному управлению техническим обслуживанием всего парка ВС, что в конечном итоге способствует повышению коэффициента технической готовности авиатранспортного предприятия [12].

Для комплексного анализа надежности механических и электромеханических компонентов воздушных судов (таких как элементы гидросистем, шасси, вспомогательные силовые установки) в системе реализован аппарат распределения Вейбулла. Данный метод является одним из ключевых инструментов для моделирования интенсивности отказов в течение жизненного цикла, так как его гибкость (за счет параметра формы β) позволяет описывать характерные фазы эксплуатации: приработку, нормальную работу и период износа [13, 14]. Универсальность данного распределения позволяет описать три крити-

ческих фазы эксплуатации: приработку, нормальную работу и износ, что наглядно демонстрируется характерной «ваннообразной» кривой интенсивности отказов (рис. 3).



Рис. 3. Кривая интенсивности отказов
Fig. 3. The failure rate curve

Применение распределения Вейбулла в контексте авиационной эксплуатации может быть расширено за счет учета корреляционных связей между последовательными отказами, что особенно важно для прогнозирования вторичных отказов в сложных системах ВС [2, 15]. Рабочий процесс применения данного метода в АСУ ПЛГ, представленный на рис. 4, включает последовательные этапы сбора данных о наработке, оценки параметров распределения и расчета вероятности безотказной работы [8].

Математический аппарат в контексте АСУ ПЛГ основан на функции вероятности безотказной работы (функции надежности). Для примера рассчитаем данный показатель типового гидронасоса системы управления механизацией крыла SSJ-100 для гидронасоса SSJ-100:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}. \quad (10)$$

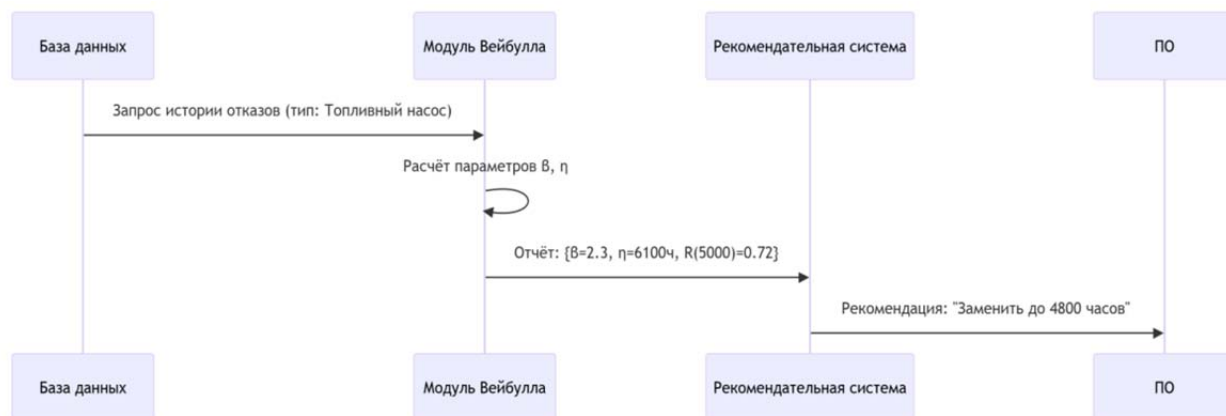


Рис. 4. Рабочий процесс распределения Вейбулла
Fig. 4. Weibull distribution workflow

Рассмотрим иллюстративный пример. Для типового гидронасоса SSJ-100 можно оценить вероятность безотказной работы $R(t)$ по формуле (10). При гипотетических параметрах (например, $t = 3\,500$ ч, $\eta = 5\,200$ ч, $\beta = 2,8$) расчет дает значение $R(t) \approx 0,78$. В рамках концепции такое значение могло бы интерпретироваться как сигнал для планирования контроля. Порог для инициации контроля (например, $R(t) < 0,8$) является настраиваемым параметром концепции, устанавливаемым на основе анализа «стоимость — риск».

Интеграция данной модели в рабочий процесс АСУ ПЛГ позволяет визуализировать зависимость вероятности безотказной работы от наработки (рис. 5). График наглядно демонстрирует взаимосвязь между временем эксплуатации и надежностью компонента, построенную по распределению Вейбулла с параметрами $\eta = 5\,200$ ч, $\beta = 2,8$. В реальной работе системы параметры η и β автоматически оцениваются для каждого компонента на основе его уникальной эксплуатационной истории, что позволяет строить персонализированные кривые и обеспечивает точность прогноза. Такая визуализация позволяет инженеру мгновенно оценить запас надежности, динамику износа, близость к критическим порогам и планировать мероприятия с учетом визуального прогноза.

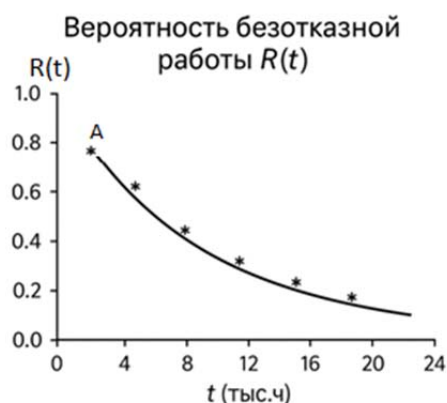


Рис. 5. Вероятность безотказной работы
Fig. 5. Probability of failure-free operation

Текущая наработка компонента (3 500 ч) соответствует точке А, где $R(t) \approx 0,78$. Горизонтальная линия на уровне $R = 0,8$ обозначает установленный порог: при снижении вероятности ниже этой границы система автоматически рекомендует провести плановый контроль. Такая визуализация позволяет инженеру мгновенно оценить запас надежности и приоритетность вмешательства.

Согласно концепции формирование предварительных рекомендаций может инициироваться при достижении пороговых значений, таких как вероятность безотказной работы $R(t)$. Например, при снижении $R(t)$ ниже установленного предела система могла бы сгенерировать структурированное уведомление для инженера. В отличие от простого от-

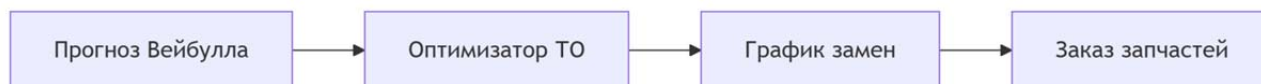


Рис. 6. Интеграция с планированием

Fig. 6. The integration with planning

слеживания наработки по документам, АСУ ПЛГ в реальном времени оценивает интегральный износ компонента на основе телеметрии, условий эксплуатации и прогнозных моделей, что позволяет перейти от обслуживания по календарному пробегу к обслуживанию по фактическому состоянию. Например, при снижении $R(t)$ ниже установленного порога система генерирует структурированное уведомление.

Компонент: Турбина двигателя ПС-90А (серийный номер 0238).

Текущая наработка: 10 050 ч.

Прогноз $R(t)$: 0,82 ($\beta = 3,1$, $\eta = 12\,600$).

Рекомендация: Запланировать замену до 11 000 ч.

Окончательное решение о характере и сроках вмешательства принимает инженер по летной годности после анализа всех данных.

К преимуществам реализации в АСУ ПЛГ относятся два ключевых аспекта. Во-первых, обеспечивается персонализация моделей за счет использования отдельных параметров для каждого двигателя с учетом условий эксплуатации (климат, режимы полета). Во-вторых, реализована глубокая интеграция с системой планирования, что иллюстрируется на рис. 6.

Данная реализация обеспечивает сквозную функциональность: интеграцию с базой данных системы, автоматический расчет вероятности отказа, генерацию предаварийных предупреждений для службы ТО и адаптацию под конкретные типы компонентов. Такой подход позволяет осуществлять проактивное планирование ремонтов, минимизируя вероятность внезапных отказов и связанные с ними эксплуатационные риски [15, 16].

Важно разграничить роли двух ключевых вероятностных моделей, используемых в си-

стеме: регрессии Кокса и распределения Вейбулла. На первый взгляд, они обе оценивают надежность, но решают принципиально разные задачи в рамках единой архитектуры АСУ ПЛГ.

Модель пропорциональных рисков Кокса является полупараметрической. Ее главная сила – в оценке влияния изменяющихся во времени ковариат на риск отказа. Она отвечает на вопрос, как текущее состояние двигателя (вибрация, температура, износ масла) влияет на вероятность его отказа в ближайшее время. Модель Кокса идеальна для индивидуального прогнозирования для каждого конкретного агрегата на основе его телеметрии в реальном времени. Она позволяет системе обнаружить зарождающийся дефект.

Модель на основе распределения Вейбулла является параметрической. Она описывает базовый закон надежности для целого класса однотипных компонентов (например, всех гидронасосов типа NS-23). Параметры распределения (β , η) характеризуют физику износа данного типа оборудования: период приработки ($\beta < 1$), нормальной эксплуатации ($\beta \approx 1$) или старения ($\beta > 1$). Модель Вейбулла отвечает на вопрос, какова вероятность безотказной работы нового гидронасоса данного типа к наработке t . Она используется для долгосрочного планирования потребности в запчастях и стратегического управления парком.

Сама система использует модели совместно. Распределение Вейбулла задает базовую линию надежности. Модель Кокса, анализируя текущие ковариаты конкретного двигателя, корректирует эту базовую линию, вычисляя его индивидуальный риск. Например, если двигатель ПД-14 эксплуатируется в тяжелых условиях (высокая вибрация, жаркий климат), модель Кокса покажет, что его



Рис. 7. Диаграмма потоков данных между модулями
Fig. 7. The diagram of data flows between the modules

риск отказа выше, чем предсказывает «усредненная» кривая Вейбулла для данного типа двигателей.

Обсуждение

Предложенная архитектурная концепция АСУ ПЛГ базируется на фундаментальном принципе подчиненной роли искусственного интеллекта (ИИ). Такой подход является методологическим стержнем концепции и обусловлен прежде всего строгими требованиями нормативной базы [7], а также необходимостью сохранения ключевой роли и ответственности сертифицированного инженерно-технического персонала. В рамках данной концепции искусственный интеллект рассматривается не как автономный субъект, а как аналитический инструмент-ассистент.

С технической точки зрения архитектура системы формирует трехуровневый барьер автономии ИИ, что наглядно отражено на UML-диаграмме потоков данных между модулями (рис. 7).

Алгоритм принятия решения, отраженный на рис. 7, функционирует следующим образом.

ИИ-прогноз: Аналитическое ядро системы формирует прогноз (оценку риска) и предварительную рекомендацию.

Верификация: Данную рекомендацию в обязательном порядке рассматривает инженер по летной годности (ИЛГ). На этом этапе инженер анализирует обоснование, сформированное механизмами объяснимого ИИ (ХАИ), проверяет исходные данные и может запросить дополнительные сведения. Блок

«Верификация» и есть процесс человеческого анализа.

Решение инженера: Инженер принимает одно из двух решений:

Утверждение: Если рекомендация обоснована, инженер ее утверждает. Далее система фиксирует решение и инициирует соответствующие процессы (планирование, заказ запчастей и т. д.).

Отклонение: Если инженер с рекомендацией не согласен, он ее отклоняет с обязательным указанием причины в системе.

Обработка отклоненного решения: Любое отклоненное решение не игнорируется, а направляется в контур «Аудит решения». Здесь оно анализируется для возможной корректировки моделей ИИ (обратная связь) и для контроля соответствия процессов нормативным требованиям. Это ключевой элемент для обучения и улучшения системы.

Итоговый результат: Финальное решение о допуске ВС к полетам принимается исключительно на основании утвержденного инженером заключения, которое учитывает как выводы ИИ, так и профессиональное суждение специалиста.

Таким образом, диаграмма отражает не линейный, а разветвленный процесс, где человек (ИЛГ) является центральным звеном верификации и принятия решения, а система обеспечивает полную прослеживаемость и учет всех случаев, включая отклонения.

1. На уровне данных ИИ имеет доступ только к сырым данным в защищенном хранилище (Data Lake), не взаимодействуя с системами управления ВС.

2. На уровне решений все выводы в обязательном порядке проходят через челове-

скую верификацию (Human Verification Gateway, HVG).

3. На нормативном уровне обеспечивается соответствие всем требованиям, исключаяющим подмену заключения инженера.

Центральным элементом системы является принцип верифицируемости выводов. Любая рекомендация, сгенерированная моделями машинного обучения (например, LSTM-сетью или моделью анализа выживаемости), сопровождается методологическим обоснованием и возможностью ручной проверки исходных данных. Это напрямую соотносится с требованием ГОСТ Р 57907-2017 о возможности переопределения автоматизированных решений и обеспечивает необходимый уровень доверия к системе со стороны эксплуатантов.

Это технически реализует и обеспечивает выполнение ключевого принципа, закрепленного в ГОСТ Р 57907-2017: окончательное решение и ответственность за допуск воздушного судна к эксплуатации остаются за сертифицированным инженерно-техническим персоналом. Предоставляя инженеру полное методологическое обоснование, доступ к исходным данным и явный механизм утверждения (отклонения) (Human Verification Gateway), система не подменяет специалиста, а дает ему расширенные аналитические возможности, сохраняя за ним право окончательного вердикта. Такой подход и обеспечивает необходимый уровень доверия к системе со стороны эксплуатантов. На практике, как показано на рис. 7, это реализовано через механизм HVG, который выступает обязательным шлюзом для всех управляющих рекомендаций, направляемых инженеру.

Функционально ИИ в системе выступает в нескольких взаимодополняющих аспектах. Как диагностический аналитик он позволяет выявлять скрытые корреляции в многопараметрических временных рядах телеметрии и классифицировать зарождающиеся дефекты, что затруднительно для традиционных методов контроля. Одновременно в качестве прогностического оптимизатора система рассчитывает интервалы технического обслуживания не по фиксированным регламентам, а на

основе непрерывной оценки фактического износа. Для этого система использует агрегированные и преобразованные данные телеметрии (такие как температура газов, вибрация, данные спектроскопии масла – см. раздел «Результаты», формулы (2)–(3)), которые служат входными параметрами для прогнозных моделей анализа выживаемости и распределения Вейбулла.

Балансировка рисков безопасности и экономических затрат осуществляется в рамках оптимизационной модели (7) через настраиваемые весовые коэффициенты в целевой функции и жесткие нормативные ограничения, исключаяющие выход за пределы безопасной эксплуатации. Таким образом, система ищет график ТО, минимизирующий затраты, но только среди сценариев, удовлетворяющих всем требованиям безопасности, заложенным в ее алгоритмы и проверяемым инженером при верификации. Важно подчеркнуть, что прогнозные модели работают в рамках предопределенных параметров (принцип контекстуальной ограниченности), анализируя исключительно структурированные данные и исторические шаблоны, и не выходят за рамки аналитической функции.

Наконец, система реализует функцию нормативного контроля, автоматически проводя аудит выполненных работ на соответствие актуальным директивам (например, EASA AD 2023-015R2) и Федеральным авиационным правилам. Это создает дополнительный контур безопасности и снижает «человеческий фактор» в части соблюдения нормативной базы.

Процесс взаимодействия в критическом сценарии, таком как отказ генератора, наглядно демонстрирует работу этих принципов и соответствует потокам данных, изображенным на рис. 7. Система детектирует аномалию, формирует структурированное предупреждение с указанием критичности, компонента и приоритета проверки, после чего инженер проводит верификацию, анализируя исторические данные и визуализацию, сгенерированную механизмами объяснимого

ИИ (ХАИ). Только после этого финальное решение фиксируется в защищенном журнале.

Важно обозначить ключевые ограничения и вызовы, связанные с реализацией предложенной концепции.

Зависимость от данных: Практическая эффективность концепции в решающей степени будет определяться объемом, качеством и репрезентативностью исторических и операционных данных, необходимых для обучения и калибровки предиктивных моделей. Проблема работы с неполными, зашумленными и цензурированными данными требует отдельного методологического внимания.

Интеграционная сложность: Внедрение подобного решения сопряжено со значительными интеграционными вызовами, включая необходимость взаимодействия с унаследованными (legacy) системами, обеспечения кибербезопасности каналов передачи данных и преодоления организационного сопротивления.

Вопросы доверия и интерпретируемости: Для принятия ответственных решений инженеру требуется понимание логики, приведшей к рекомендации. Поэтому крайне важным направлением развития концепции является интеграция методов объяснимого ИИ (ХАИ), которые повысят прозрачность сложных моделей (например, ансамблей на основе LSTM) и укрепят доверие пользователей.

Регуляторное соответствие: Несмотря на заложенный в концепцию принцип Human Verification Gateway, процедура сертификации подобной системы регуляторными органами (ФАВТ, EASA) потребует отдельной глубокой проработки и, вероятно, создания новых стандартов.

Заключение

В результате проведенного исследования разработана архитектура автоматизированной системы управления поддержанием летной годности с интеграцией элементов искусственного интеллекта. Основные научные

и практические результаты работы заключаются в следующем.

1. Разработана и научно обоснована многоуровневая архитектура АСУ ПЛГ, реализующая принципы многоуровневых экспертных систем [6] и обеспечивающая сквозную обработку данных от сбора телеметрии до формирования управляющих решений. Архитектура включает четыре ключевых слоя: сбора данных, обработки, принятия решений и интерфейсный слой.

2. Реализован принцип подчиненной роли искусственного интеллекта, соответствующий требованиям Федеральных авиационных правил [7] и ГОСТ Р 57907-2017. Система позиционирует ИИ как аналитический инструмент-ассистент, не обладающий доступом к исполнительным механизмам, с обязательной верификацией выводов через Human Verification Gateway.

3. Разработан комплекс математических моделей для решения ключевых задач поддержания летной годности:

- модель прогнозирования отказов на основе регрессии Кокса [8] с учетом цензурированных данных;
- модель оптимизации технического обслуживания методами целочисленного программирования;
- модель анализа надежности на основе распределения Вейбулла [13] с учетом корреляционных связей.

4. Теоретически и методологически обосновано соответствие системы принципам поддержания летной годности, включая ориентацию на эксплуатационную фазу жизненного цикла ВС (65 % от общего цикла) и реализацию механизма непрерывного мониторинга.

Перспективы дальнейших исследований связаны с развитием методов объяснимого искусственного интеллекта (ХАИ) для повышения доверия к рекомендациям системы, а также с интеграцией цифровых двойников критических систем воздушных судов для более точного прогнозирования остаточного ресурса.

Список литературы

1. Самуленков Ю.И., Филатова Я.А., Грузд А.Д. Построение имитационной математической модели системы технического обслуживания воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. 2021. Т. 24, № 4. С. 38–49. DOI: 10.26467/2079-0619-2021-24-4-38-49
2. Лапшин В.А. Онтологии в компьютерных системах. М.: Научный мир, 2010. 224 с.
3. Чинючин Ю.М., Смирнов Н.Н., Кирдюшкин В.С. Проблемы совершенствования системы поддержания летной годности воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. 2012. № 178. С. 7–12.
4. Чинючин Ю.М. Методология и современные научные проблемы технической эксплуатации летательных аппаратов: учеб. пособие. М.: МГТУ ГА, 1999. 64 с.
5. Большедворский Г.А., Дадобаев Х.Г. Методологические аспекты поддержания летной годности воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. 2013. № 197. С. 31–35.
6. Балтрашевич В.Э. Архитектура многоуровневых экспертных систем // Тенденции развития науки и образования. 2022. № 84-1. С. 75–79. DOI: 10.18411/trnio-04-2022-17
7. Васильев Ю.А., Петровский М.И., Машечкин И.В. Применение регуляризации при вычислении критериев разбиения в моделях анализа выживаемости // Вычислительные методы и программирование. 2024. Т. 25, № 3. С. 357–377. DOI: 10.26089/NumMet.v25r328
8. Микулик И.И. Методика для решения задачи выбора признаков в регрессионной модели Кокса // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2024. № 3. С. 85–94. DOI: 10.24143/2072-9502-2024-3-85-94
9. Чинючин Ю.М., Тарасов С.П. Нормативная база технической эксплуатации и сохранения летной годности воздушных судов: учеб. пособие. М.: МГТУ ГА, 2003. 96 с.
10. Чинючин Ю.М., Грузд А.Д. К вопросу прогнозного метода формирования оптимальных режимов технического обслужи-

вания функциональных систем воздушных судов // Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества: сборник тезисов докладов Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию отечественной гражданской авиации. Москва, 18–19 мая 2023 г. М.: ИД Академии имени Н.Е. Жуковского, 2023. С. 293–295.

11. Ицкович А.А., Алексанян А.Р., Файнбург И.А. Построение математической модели процессов технической эксплуатации авиационной техники как замкнутой системы массового обслуживания // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 219 (9). С. 46–52.

12. Писаренко В.Н. Техническое обслуживание воздушных судов как система поддержания летной годности гражданской авиационной техники: монография [Электронный ресурс] // Самара: СамНЦ РАН, 2017. 170 с. URL: <https://repo.ssau.ru/jspui/bitstream/123456789/42797/1/Писаренко%20В.Н.%20Техническое%20обслуживание%20017.pdf> (дата обращения: 10.12.2025).

13. Шепета А.П., Исаков В.И. Корреляционные функции случайных процессов, распределенных по закону Вейбулла // Инновации в сфере информационных технологий: от идеи к внедрению (ИвСИТ-2024): сборник материалов III международной научно-практической конференции. Ивангород, 29 октября 2024 г. Казань: ООО «Бук», 2024. С. 23–28.

14. Подоплекин Ю.Ф., Шепета Д.А., Иванов И.Н. Моделирование анизотропного стохастического пространственного поля, распределенного по закону Вейбулла // Морская радиоэлектроника. 2024. № 3 (89). С. 48–53.

15. Cox D.R. Regression models and life-tables // Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological). 1972. Vol. 34, iss. 2. Pp. 187–220. DOI: 10.1111/j.2517-6161.1972.tb00899.x

16. Герасимова Е.Д., Смирнов Н.Н., Ойдов Н. Влияние надежности функциональных систем на эффективность технической эксплуатации воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 1. С. 45–52.

References

1. Samulenkov, Yu.I., Filatova, Ya.A., Gruz, A.D. (2021). Aircraft maintenance system simulation mathematical model construction. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 24, no. 4, pp. 38–49. DOI: 10.26467/2079-0619-2021-24-4-38-49 (in Russian)
2. Lapshin, V.A. (2010). Ontologies in computer systems. Moscow: Nauchnyy mir, 224 p. (in Russian)
3. Chinyuchin, Y.M., Smirnov, N.N., Kirdyushkin, V.S. (2012). Problems of aircraft airworthiness keeping system development. *Nauchnyy vestnik MGTU GA*, no. 178, pp. 7–12. (in Russian)
4. Chinyuchin, Yu.M. (1999). Methodology and modern scientific problems of aircraft technical operation: Tutorial. Moscow: MGTU GA, 64 p. (in Russian)
5. Bolshedvorsky, G.A., Dadobaev, H.G. (2013). Methodological aspects of aircraft's maintenance airworthiness. *Nauchnyy vestnik MGTU GA*, no. 197, pp. 31–35. (in Russian)
6. Baltrashevich, V.E. (2022). Architecture of multilevel expert systems. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*, no. 84-1, pp. 75–79. DOI: 10.18411/trnio-04-2022-17 (in Russian)
7. Vasilev, Iu.A., Petrovskiy, M.I., Mashechkin, I.V. (2024). Applying regularization to calculate split criterion for survival models. *Numerical methods and programming*, vol. 25, no. 3, pp. 357–377. DOI: 10.26089/NumMet.v25r328 (in Russian)
8. Mikulik, I.I. (2024). Methodology of solving the feature selection problem for the cox regression model. *Vestnik of astrakhan state technical university. Series: management, computer science and informatics*, no. 3, pp. 85–94. DOI: 10.24143/2072-9502-2024-3-85-94 (in Russian)
9. Chinyuchin, Yu.M., Tarasov, S.P. (2003). Regulatory framework for technical operation and maintaining airworthiness of aircraft: Tutorial. Moscow: MGTU GA, 96 p. (in Russian)
10. Chinyuchin, Yu.M., Gruz, A.D. (2023). On the issue of the predictive method for forming optimal maintenance regimes for functional systems of aircraft. In: *Grazhdanskaya aviatsiya na sovremennom etape razvitiya nauki, tekhniki i obshchestva: sbornik tezisov dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu otechestvennoy grazhdanskoy aviatsii*. Moscow: ID Akademii imeni N.Ye. Zhukovskogo, pp. 293–295. (in Russian)
11. Aleksanyan, A.R., Itskovich, A.A., Faynburg, I.A. (2015). The construction of mathematical model of processes of maintenance of aircraft engineering as a closed service system. *Nauchnyy vestnik MGTU GA*, no. 219 (9), pp. 46–52. (in Russian)
12. Pisarienko, V.N. (2017). Aircraft maintenance as a system for the airworthiness support of civil aviation aircraft: Monograph. Samara: SamNTs RAN, 170 p. Available at: <https://repo.ssau.ru/jspui/bitstream/123456789/42797/1/Писаренко%20В.Н.%20Техническое%20обслуживание%202017.pdf> (accessed: 10.12.2025). (in Russian)
13. Shepeta, A.P., Isakov, V.I. (2024). Correlation functions of random processes distributed according to the Weibull law. In: *Innovatsii v sfere informatsionnykh tekhnologiy: ot idei k vnedreniyu (IvSIT-2024): sbornik materialov III mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Kazan: OOO "Buk", pp. 23–28. (in Russian)
14. Podoplekin, Yu.F., Shepeta, D.A., Ivanov, I.N. (2024). Modeling of anisotropic stochastic spatial field distributed according to the weibull law. *Morskaya radioelektronika*, no. 3 (89), pp. 48–53. (in Russian)
15. Cox, D.R. (1972). Regression models and life-tables. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, vol. 34, issue 2, pp. 187–220. DOI: 10.1111/j.2517-6161.1972.tb00899.x
16. Gerasimova, E.D., Smirnov, N.N., Nambat, O. (2017). The effect of reliability of functional systems on the efficiency of the technical operation of the aircraft. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 20, no. 1, pp. 45–52. (in Russian)

Сведения об авторах

Подосенов Сергей Сергеевич, аспирант кафедры вычислительных машин, комплексов, систем и сетей МГТУ ГА, специалист по сопровождению и внедрению ПО «ОС-Технолоджи», bekar999@mail.ru.

Феоктистова Оксана Геннадьевна, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой вычислительных машин, комплексов, систем и сетей МГТУ ГА, o.feoktistova@mstuca.ru.

Information about the authors

Sergey S. Podosenov, Postgraduate Student of the Computing Machines, Complexes, Systems and Networks Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Software Support and Implementation Specialist at OS-Technologies, bekar999@mail.ru.

Oksana G. Feoktistova, Doctor of Technical Sciences, Professor, the Head of the Computing Machines, Complexes, Systems and Networks Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, o.feoktistova@mstuca.ru.

Поступила в редакцию	22.01.2026	Received	22.01.2026
Одобрена после рецензирования	04.03.2026	Approved after reviewing	04.03.2026
Принята в печать	23.07.2026	Accepted for publication	23.07.2026