INTERNATIONAL JOURNAL OF TECHNOLOGY AND ACADEMIC RESEARCH

ISSN: 2224-6878 | Pakistan Volume 6, No. 10.

IF: 14.91 | 2026 http://waerasia.org/index.php/ijtar

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ФОРМИРОВАНИЯ АДАПТИВНОГО РЕГЛАМЕНТА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ МОНИТОРИНГА ИНДИВИДУАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

Подполковник **Шакирджанов Александр Игоревич**,
преподаватель кафедры подготовки авиационных инженеров Института военной авиации Университета военной безопасности и обороны Республики Узбекистан
alexsandr85177@gmail.com
doi:**https://doi.org/10.5281/zenodo.23754856**

АННОТАЦИЯ: В статье рассматриваются вопросы совершенствования методики формирования адаптивного регламента технического обслуживания летательных аппаратов на основе непрерывного мониторинга их индивидуального технического состояния. Обоснована необходимость перехода от преимущественно планово-предупредительного технического обслуживания, основанного на фиксированных межрегламентных интервалах, к дифференцированному управлению техническим обслуживанием с учетом фактической эксплуатационной нагруженности, интенсивности использования, климатических воздействий и индивидуальных закономерностей изменения технического состояния авиационной техники.

Предложен методический подход, предусматривающий комплексное использование параметрической диагностики, анализа эксплуатационных данных, оценки эквивалентной наработки, прогнозирования остаточного ресурса и формирования индивидуальных межрегламентных интервалов. Особое внимание уделено учету повышенной температуры окружающей среды, запыленности атмосферы и переменных режимов эксплуатации, характерных для регионов с жарким и засушливым климатом.

Разработана концептуальная математическая модель адаптивного регулирования периодичности технического обслуживания, основанная на интегральной оценке технического состояния и прогнозируемом остаточном ресурсе элементов авиационной техники. Предложена последовательность формирования адаптивного регламента, включающая сбор и обработку диагностической информации, определение эксплуатационной нагруженности, прогнозирование технического состояния, оценку допустимого интервала до очередного обслуживания и принятие технического решения.

На условном расчетном примере продемонстрирована возможность индивидуального определения сроков проведения технического обслуживания для летательных аппаратов, эксплуатируемых в различных условиях. Практическая значимость предложенного подхода заключается в создании методической основы для повышения обоснованности планирования технического обслуживания, предупреждения отказов, сокращения необоснованных регламентных операций и повышения технической готовности авиационной техники при соблюдении установленных требований безопасности полетов.

Ключевые слова: авиационная техника, летательный аппарат, техническая эксплуатация, индивидуальное техническое состояние, адаптивный регламент, техническое обслуживание, параметрическая диагностика, мониторинг, эквивалентная

ISSN: 2224-6878 | Pakistan Volume 6, No. 10.

IF: 14.91 | 2026 http://waerasia.org/index.php/ijtar

наработка, остаточный ресурс, RUL, прогнозирование отказов, климатические факторы, техническая готовность.

ABSTRACT: This article examines the improvement of the methodology for developing an adaptive aircraft maintenance schedule based on continuous monitoring of individual technical condition. The necessity of transitioning from predominantly preventive maintenance based on fixed maintenance intervals to a differentiated maintenance management approach is substantiated. This approach takes into account actual operational loads, intensity of aircraft utilization, climatic influences, and individual patterns of changes in the technical condition of aviation equipment.

A methodological approach is proposed that integrates parametric diagnostics, operational data analysis, equivalent operating time assessment, Remaining Useful Life (RUL) prediction, and the determination of individual maintenance intervals. Particular attention is paid to the effects of elevated ambient temperatures, atmospheric dust contamination, and variable operating conditions typical of regions characterized by hot and arid climates.

A conceptual mathematical model for the adaptive adjustment of maintenance intervals has been developed based on an integrated assessment of technical condition and the predicted remaining useful life of aircraft components. A systematic procedure for developing an adaptive maintenance schedule is proposed, including the collection and processing of diagnostic information, assessment of operational loads, prediction of technical condition, determination of the permissible interval before the next maintenance operation, and technical decision-making.

A hypothetical numerical example demonstrates the feasibility of determining individualized maintenance intervals for aircraft operating under different conditions. The practical significance of the proposed approach lies in establishing a methodological framework for improving the effectiveness of maintenance planning, preventing failures, reducing unnecessary scheduled maintenance operations, and enhancing aircraft operational readiness while ensuring compliance with established flight safety requirements.

Keywords: aviation equipment, aircraft, technical operation, individual technical condition, adaptive maintenance schedule, aircraft maintenance, parametric diagnostics, condition monitoring, equivalent operating time, remaining useful life (RUL), failure prediction, climatic factors, operational readiness.

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие авиационной техники сопровождается усложнением конструкции летательных аппаратов, увеличением количества контролируемых параметров, совершенствованием бортовых систем регистрации информации и повышением требований к надежности и безопасности полетов. В этих условиях особую актуальность приобретает совершенствование системы технической эксплуатации авиационной техники, направленное на поддержание ее исправного состояния, рациональное использование технического ресурса и обеспечение требуемого уровня готовности к выполнению полетных заданий.

В традиционной системе планово-предупредительного технического обслуживания (ТО) значительная часть регламентных работ выполняется через заранее установленные интервалы наработки, календарного времени или количества эксплуатационных циклов. Такой подход обеспечивает организационную упорядоченность технической эксплуатации, однако не всегда позволяет в полной мере учитывать индивидуальные особенности изменения технического состояния отдельных летательных аппаратов.

ISSN: 2224-6878 | Pakistan Volume 6, No. 10.

IF: 14.91 | 2026 http://waerasia.org/index.php/ijtar

Даже при одинаковом типе, сроке службы и близкой суммарной наработке фактическое техническое состояние авиационной техники может существенно различаться. Причинами подобных различий являются неодинаковая интенсивность эксплуатации, особенности выполнения полетных заданий, число взлетно-посадочных циклов, продолжительность работы силовой установки на различных режимах, температурные нагрузки, воздействие пыли и другие внешние факторы.

В результате отдельные агрегаты могут подвергаться ускоренному изнашиванию и нуждаться в дополнительных диагностических мероприятиях до наступления установленного срока обслуживания. В то же время технически исправные элементы, эксплуатировавшиеся в относительно благоприятных условиях, могут сохранять значительный запас работоспособности на момент выполнения плановых регламентных операций.

Данное обстоятельство обусловливает необходимость совершенствования методики планирования технического обслуживания на основе фактического состояния авиационной техники.

Современные научные исследования в области Prognostics and Health Management (PHM) рассматривают мониторинг технического состояния, диагностирование, прогнозирование отказов и принятие решений по обслуживанию как взаимосвязанные процессы. В частности, исследования J. Sun и соавторов (2025), а также J. Chia и соавторов (2024) подтверждают перспективность использования прогностических моделей и цифровых двойников для совершенствования технической эксплуатации воздушных судов [1, 2].

Важным направлением является переход от анализа усредненных статистических показателей надежности парка к индивидуальной оценке состояния каждого летательного аппарата и его функциональных систем.

Особенно актуален указанный подход для авиационной техники, эксплуатируемой в условиях жаркого и засушливого климата. Повышенная температура окружающего воздуха, высокая концентрация пылевых частиц, интенсивное солнечное излучение и значительные суточные колебания температуры могут влиять на процессы старения материалов, изменение характеристик агрегатов, загрязнение фильтрующих элементов и изнашивание деталей авиационных двигателей.

Исследования C. L. Ryder и соавторов (2024) показывают, что воздействие атмосферной минеральной пыли на авиационные двигатели определяется не только количеством полетов, но и концентрацией пылевых частиц, высотным профилем полета и режимами работы силовой установки. Следовательно, при планировании технического обслуживания необходимо учитывать не только традиционные показатели наработки, но и фактическую эксплуатационную нагрузку [5].

Таким образом, научная задача заключается в разработке методики, обеспечивающей преобразование результатов мониторинга индивидуального технического состояния в обоснованные рекомендации по корректировке сроков и состава технического обслуживания летательных аппаратов.

Цель исследования — совершенствование методики формирования адаптивного регламента технического обслуживания летательных аппаратов путем комплексного учета индивидуального технического состояния, фактической эксплуатационной нагруженности, климатических воздействий и прогнозируемого остаточного ресурса.

Для достижения поставленной цели предусматривается решение следующих задач:

ISSN: 2224-6878 | Pakistan Volume 6, No. 10.

IF: 14.91 | 2026 http://waerasia.org/index.php/ijtar

1. Проанализировать существующие подходы к организации технического обслуживания авиационной техники и выявить ограничения использования фиксированных межрегламентных интервалов.
2. Определить совокупность диагностических и эксплуатационных показателей, характеризующих индивидуальное техническое состояние летательного аппарата.
3. Разработать математические зависимости для оценки эквивалентной наработки с учетом эксплуатационных и климатических факторов.
4. Предложить алгоритм прогнозирования остаточного ресурса и определения индивидуального интервала до очередного технического обслуживания.
5. Обосновать структуру адаптивного регламента и показатели оценки его эффективности.

Объект исследования — процесс технического обслуживания и технической эксплуатации летательных аппаратов.

Предмет исследования — методы и модели формирования адаптивной периодичности технического обслуживания на основе мониторинга индивидуального технического состояния авиационной техники.

Научная гипотеза исследования заключается в том, что совместное использование индивидуальных диагностических показателей, эквивалентной эксплуатационной наработки и вероятностного прогноза остаточного ресурса позволит повысить обоснованность выбора сроков технического обслуживания по сравнению с использованием только фиксированной календарной или часовой периодичности.

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Методологические основы формирования адаптивного регламента

В основу исследования положен комплексный подход, объединяющий методы теории надежности, технической диагностики, математической статистики, прогнозирования остаточного ресурса и оптимизации процессов технического обслуживания.

В отличие от традиционного подхода, основанного преимущественно на нормативной периодичности, адаптивный регламент предполагает динамическое определение необходимости и сроков выполнения диагностических и обслуживающих операций с учетом текущего состояния конкретного объекта авиационной техники.

При этом адаптивный регламент не должен рассматриваться как механизм произвольного изменения установленных ограничений. Обязательные ресурсные, календарные и эксплуатационные требования сохраняют приоритет. Изменение регламентированных интервалов допускается только в предусмотренном нормативными документами порядке.

Данный принцип соответствует общему подходу к управлению надежностью, представленному в рекомендациях FAA AC 120-17B, в которых корректировка периодичности обслуживания связывается с установленной программой надежности, анализом эксплуатационных данных и соответствующими полномочиями эксплуатанта [12].

Предлагаемая методика базируется на следующих принципах:

Индивидуализация — оценка технического состояния каждого летательного аппарата с учетом истории его эксплуатации.

Комплексность — одновременный учет диагностических параметров, эксплуатационных нагрузок и факторов окружающей среды.

Прогностичность — использование моделей изменения технического состояния для оценки остаточного ресурса.

ISSN: 2224-6878 | Pakistan Volume 6, No. 10.

IF: 14.91 | 2026 http://waerasia.org/index.php/ijtar

Адаптивность — динамическое уточнение сроков и состава обслуживания при поступлении новой диагностической информации.

Приоритет безопасности — исключение решений, противоречащих обязательным ограничениям и требованиям эксплуатационной документации.

1.2. Формирование информационной базы мониторинга

Основой адаптивного управления техническим обслуживанием является достоверная информация об индивидуальном техническом состоянии летательного аппарата.

Для реализации предлагаемой методики целесообразно сформировать единый информационный массив, содержащий результаты регистрации параметров полета, сведения о техническом состоянии агрегатов, результаты проведенных проверок, данные о неисправностях и условиях эксплуатации.

Основные группы используемой информации представлены в табл. 1.

Таблица 1. Система показателей мониторинга индивидуального технического состояния летательного аппарата

Группа показателей	Контролируемые параметры	Назначение
Эксплуатационные	Налет в часах, количество полетов, взлетов и посадок, продолжительность работы на различных режимах	Оценка фактической наработки
Нагрузочные	Перегрузки, вибрации, скоростные режимы, температурные и силовые воздействия	Оценка интенсивности нагружения
Диагностические	Температура, давление, вибрационные характеристики, параметры масла, отклонения работы агрегатов	Определение технического состояния
Климатические	Температура воздуха, запыленность, влажность, характер температурных изменений	Учет внешних воздействий
Ресурсные	Назначенный ресурс, межремонтная наработка, остаточный ресурс, ресурсные ограничения	Контроль допустимой эксплуатации
Информационные	История отказов, неисправностей, ремонтов, замен и результатов проверок	Анализ индивидуальных закономерностей деградации

Источниками данных могут выступать штатные бортовые средства регистрации полетной информации, системы контроля параметров авиационных двигателей, наземные диагностические комплексы, журналы технического обслуживания и автоматизированные системы учета состояния авиационной техники.

Для обеспечения сопоставимости получаемых результатов необходима предварительная обработка информации, включающая проверку ее полноты, временную синхронизацию, исключение ошибочных измерений и нормализацию диагностических параметров относительно соответствующих эксплуатационных режимов.

Принципиально важно учитывать, что одно и то же значение диагностического параметра при различных режимах работы агрегата может характеризовать неодинаковое техническое состояние. Поэтому сравнение должно производиться не только с абсолютными предельными значениями, но и с эталонными характеристиками для соответствующих условий эксплуатации.

ISSN: 2224-6878 | Pakistan Volume 6, No. 10.

IF: 14.91 | 2026 http://waerasia.org/index.php/ijtar

1.3. Интегральная оценка индивидуального технического состояния

Для количественной оценки технического состояния предлагается использовать интегральный показатель, формируемый на основе совокупности диагностических признаков.

Нормированное отклонение отдельного диагностического параметра можно представить выражением:

$$d_{ij}(t)=\frac{\left|x_{ij}(t)-x_{ij}^{ref}(u_t)\right|}{L_{ij}}. \qquad 1)$$

где $d_{ij}(t)$ — нормированное отклонение j-го параметра i-го летательного аппарата; $x_{ij}(t)$ — фактическое значение контролируемого параметра; $x_{ij}^{ref}(u_t)$ — эталонное значение параметра при соответствующих условиях эксплуатации u_t; L_{ij} — установленный масштаб диагностически значимого отклонения.

Значение L_{ij} определяется на основе эксплуатационной документации, диагностических критериев или результатов предварительной идентификации модели.

Для формирования интегральной оценки предлагается использовать выражение:

$$H_i(t)=1-\sum_{j=1}^{m} w_j\, q_{ij}(t). \qquad 2)$$

при условиях:

$$\sum_{j=1}^{m} w_j=1, \qquad q_{ij}(t)=\min\{1,d_{ij}(t)\}. \qquad 3)$$

где $H_i(t)$ — интегральный показатель технического состояния; w_j — весовой коэффициент значимости диагностического параметра; $q_{ij}(t)$ — нормированная степень отклонения диагностического параметра; m — количество контролируемых параметров.

При такой нормировке показатель $H_i(t)$ изменяется в диапазоне от 0 до 1. Значения, близкие к единице, характеризуют малые отклонения контролируемых параметров от выбранного эталонного состояния.

Весовые коэффициенты определяются с учетом влияния соответствующих параметров на работоспособность и надежность контролируемого агрегата.

Предложенный показатель предназначен для сравнительной оценки и анализа тенденций изменения технического состояния. Он не заменяет контроль отдельных критически важных параметров. Превышение любого обязательного предельного значения требует принятия предусмотренных эксплуатационной документацией мер независимо от величины интегрального показателя.

1.4. Учет эксплуатационной нагруженности и климатических факторов

Одним из основных недостатков использования исключительно фактической наработки является невозможность непосредственного отражения различий в интенсивности изнашивания элементов конструкции.

Например, два летательных аппарата с одинаковым налетом могут иметь различные уровни накопленного повреждения вследствие неодинакового числа циклов нагружения, продолжительности работы двигателей на повышенных режимах или эксплуатации в условиях значительной запыленности.

Для учета указанных различий предлагается использовать показатель эквивалентной наработки:

ISSN: 2224-6878 | Pakistan Volume 6, No. 10.

IF: 14.91 | 2026 http://waerasia.org/index.php/ijtar

$$T_{eq,ij}=\sum_{k=1}^{n}\Delta t_k K_{ij,k}. \quad (4)$$

где $T_{eq,ij}$ — эквивалентная наработка j-го контролируемого объекта на i-м летательном аппарате; Δt_k — продолжительность k -го эксплуатационного интервала; $K_{ij,k}$ — коэффициент эквивалентной эксплуатационной нагруженности; n — количество учитываемых интервалов эксплуатации.

Коэффициент эквивалентной нагруженности может определяться с учетом нескольких факторов:

$$K_{ij,k}=1+\alpha_{1j}Z_{load,k}+\alpha_{2j}Z_{temp,k}+\alpha_{3j}Z_{dust,k}+\alpha_{4j}Z_{cycle,k}. \quad (5)$$

где $Z_{load,k}$ — нормированная характеристика механической или режимной нагруженности; $Z_{temp,k}$ — характеристика температурного воздействия; $Z_{dust,k}$ — характеристика пылевого воздействия; $Z_{cycle,k}$ — характеристика циклической нагруженности; $\alpha_{1j},\ldots,\alpha_{4j}$ — коэффициенты влияния соответствующих факторов на изменение состояния конкретного агрегата.

Коэффициенты α подлежат определению по экспериментальным и эксплуатационным данным. Поскольку факторы могут взаимодействовать между собой, при наличии достаточной статистической информации модель может дополняться нелинейными и перекрестными составляющими.

Формула (5) представляет собой начальную параметрическую модель. Она не предполагает универсальности коэффициентов для всех типов летательных аппаратов и элементов конструкции.

Особого внимания заслуживает оценка пылевой нагрузки авиационного двигателя. Ее можно характеризовать накопленной массой частиц, поступающих в газовоздушный тракт:

$$M_{dust}=\int_0^T C_d(t)\dot{V}_a(t)\eta_{ing}(t)\,dt. \quad (6)$$

где M_{dust} — расчетная масса поступивших пылевых частиц; $C_d(t)$ — массовая концентрация пыли в воздухе; $\dot{V}_a(t)$ — объемный расход воздуха через соответствующий тракт; $\eta_{ing}(t)$ — доля частиц, поступающих в контролируемую область двигателя; T — рассматриваемый интервал эксплуатации.

Расчетная пылевая нагрузка может использоваться как дополнительный диагностический признак при моделировании загрязнения компрессора, эрозионного изнашивания лопаток и изменения рабочих характеристик двигателя.

Исследование Li и соавторов (2026) демонстрирует влияние концентрации песчаных частиц на интенсивность эрозионного повреждения лопаток авиационных компрессоров. Это подтверждает необходимость раздельного учета фактической наработки и повреждающего воздействия окружающей среды [6].

Следует отметить, что учет климатических воздействий должен осуществляться дифференцированно. Например, запыленность наиболее непосредственно связана с состоянием воздухозаборных трактов, компрессоров и фильтрующих элементов, тогда как циклические механические нагрузки могут иметь определяющее значение при оценке усталостного состояния силовых элементов конструкции.

Таким образом, эквивалентную наработку целесообразно рассчитывать не для летательного аппарата в целом по единому коэффициенту, а отдельно для основных групп агрегатов и конструктивных элементов.

ISSN: 2224-6878 | Pakistan Volume 6, No. 10.

IF: 14.91 | 2026 http://waerasia.org/index.php/ijtar

2.РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ФОРМИРОВАНИЯ АДАПТИВНОГО РЕГЛАМЕНТА

2.1. Прогнозирование остаточного ресурса элементов авиационной техники

Одним из основных компонентов адаптивного регламента является прогнозирование остаточного ресурса контролируемого объекта.

Остаточный ресурс, или Remaining Useful Life (RUL), характеризует прогнозируемую продолжительность функционирования элемента до достижения заранее определенного предельного состояния при заданных условиях дальнейшей эксплуатации.

В общем виде прогноз остаточного ресурса можно представить функциональной зависимостью:

$$RUL_{ij}(t)=f\left(H_{ij}(t),\frac{dH_{ij}}{dt},T_{eq,ij},U_i(t),E_i(t)\right). \quad 7)$$

где $H_{ij}(t)$ — оценка технического состояния контролируемого элемента; dH_{ij}/dt — скорость изменения технического состояния; $T_{eq,ij}$ — накопленная эквивалентная наработка; $U_i(t)$ — параметры эксплуатационных режимов; $E_i(t)$ — параметры воздействия окружающей среды.

В зависимости от особенностей контролируемого объекта могут использоваться статистические, физико-математические, вероятностные и комбинированные модели прогнозирования.

Для агрегатов, деградация которых проявляется в постепенном изменении диагностических характеристик, применимы методы анализа временных рядов, регрессионные модели, модели случайных процессов и алгоритмы машинного обучения.

В случае наличия физических моделей повреждаемости предпочтительно совместное использование расчетных и диагностических данных. Такой подход позволяет повысить интерпретируемость результатов прогнозирования.

Отдельного внимания требует неопределенность прогноза. Согласно современным исследованиям, использование только точечной оценки RUL недостаточно для принятия ответственных решений о техническом обслуживании, поскольку прогноз может иметь существенную погрешность. В частности, Robinson (2026) предлагает учитывать прогностические интервалы при оценке остаточного ресурса авиационных двигателей [4].

Поэтому для определения момента обслуживания целесообразно использовать нижнюю доверительно обоснованную границу прогноза, соответствующую заданному уровню допустимого риска:

$$RUL_{ij}^{-}=Q_\alpha\left(RUL_{ij} \mid D_i(t)\right). \quad 8)$$

где Q_α — нижний квантиль прогнозируемого распределения остаточного ресурса; α — выбранный уровень вероятности; $D_i(t)$ — накопленная диагностическая и эксплуатационная информация.

При корректно откалиброванном прогнозе нижний квантиль позволяет формировать более консервативные решения, чем использование среднего значения остаточного ресурса.

Применимость вероятностной оценки должна быть подтверждена для рассматриваемого типа агрегатов, режимов эксплуатации и объема доступных данных.

2.2. Определение индивидуального интервала технического обслуживания

Формирование адаптивного регламента предполагает определение рационального интервала до очередного технического воздействия.

ISSN: 2224-6878 | Pakistan Volume 6, No. 10.

IF: 14.91 | 2026 http://waerasia.org/index.php/ijtar

При этом целесообразно учитывать одновременно несколько ограничивающих факторов: остаток нормативного межрегламентного интервала, эквивалентную наработку, прогноз остаточного ресурса и результаты диагностики.

Предлагается следующая зависимость:

$$\Delta T_{ad,ij}=\max\{0;\ \min(\Delta T_{reg,ij},\Delta T_{eq,ij},\gamma_j \underline{RUL}_{ij},\Delta T_{diag,ij})\}. \quad 9)$$

где $\Delta T_{ad,ij}$ — рекомендуемый адаптивный интервал до очередного технического воздействия; $\Delta T_{reg,ij}$ — оставшаяся допустимая наработка до обязательного регламентного обслуживания; $\Delta T_{eq,ij}$ — оставшийся интервал по критерию эквивалентной наработки; γ_j — дополнительный коэффициент консервативности прогноза, $0<\gamma_j\leq 1$; $\underline{RUL}_{ij}$ — нижняя оценка прогнозируемого остаточного ресурса; $\Delta T_{diag,ij}$ — интервал, установленный по результатам диагностики и контроля тенденций изменения технического состояния.

Если прогнозируемая эквивалентная нагруженность в предстоящем периоде характеризуется коэффициентом $\hat{K}_{ij}$, оставшийся интервал по данному критерию определяется выражением:

$$\Delta T_{eq,ij}=\frac{T_{eq,ij}^{lim}-T_{eq,ij}^{current}}{\hat{K}_{ij}}. \quad 10)$$

где $T_{eq,ij}^{lim}$ — обоснованное предельное значение эквивалентной наработки для принятой расчетной модели; $T_{eq,ij}^{current}$ — накопленная эквивалентная наработка; $\hat{K}_{ij}$ — прогнозируемый коэффициент нагруженности.

Предельное значение эквивалентной наработки должно определяться на основе предварительно подтвержденной модели повреждаемости. Оно не может автоматически приравниваться к назначенному ресурсу или межрегламентному интервалу без соответствующего обоснования.

Формула (9) применяется при выражении всех ее составляющих в сопоставимых единицах наработки. Календарные ограничения, ограничения по количеству циклов и другие обязательные требования учитываются дополнительно и независимо.

Если расчетный интервал становится меньше нормативного, формируется рекомендация о досрочном контроле или выполнении предусмотренной технической операции.

Если расчетный интервал превышает нормативный, обслуживание выполняется не позднее установленного срока, если отсутствует отдельно утвержденное разрешение на изменение периодичности.

Таким образом, предложенная модель обеспечивает индивидуализацию планирования технического обслуживания без автоматического изменения обязательных ограничений.

2.3. Алгоритм реализации адаптивного регламента

Практическая реализация предлагаемой методики осуществляется в виде последовательности взаимосвязанных этапов.

ISSN: 2224-6878 | Pakistan Volume 6, No. 10.

IF: 14.91 | 2026 http://waerasia.org/index.php/ijtar

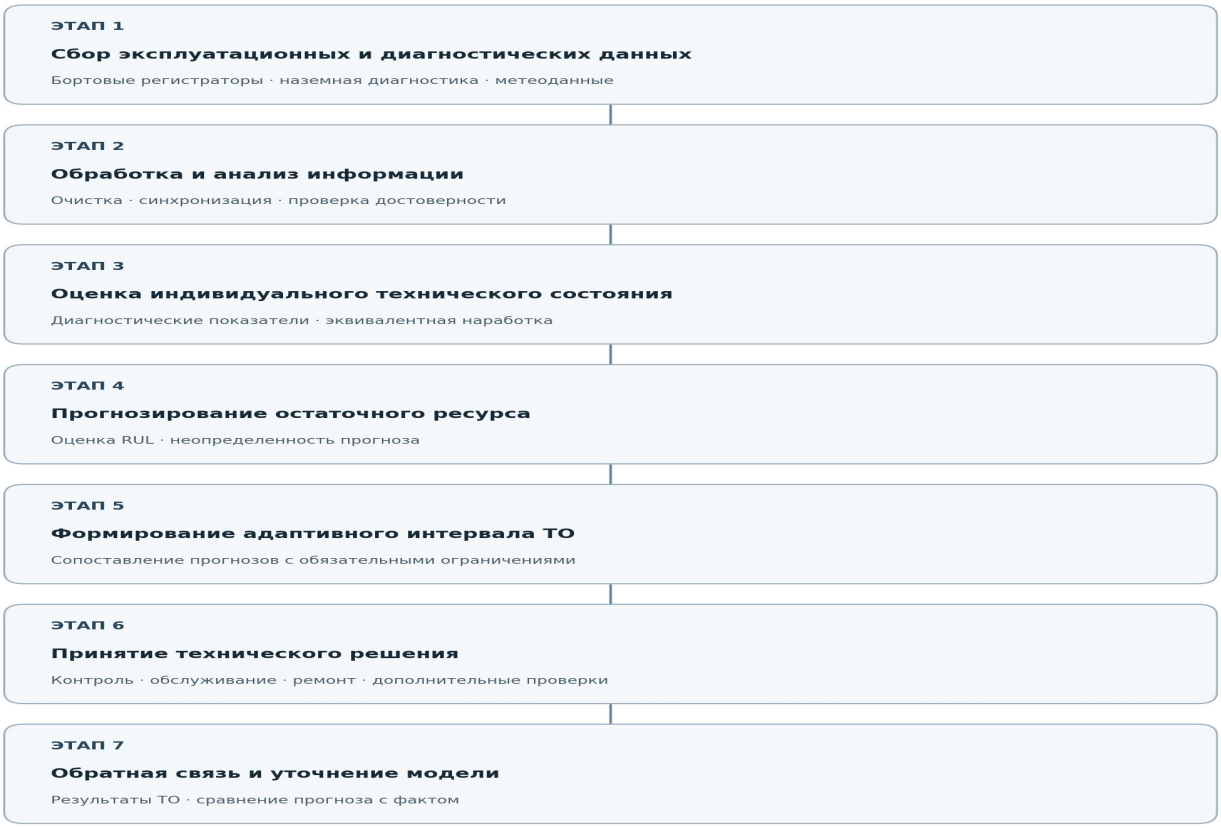


Рисунок 1. Структурно-логическая схема предлагаемой методики формирования адаптивного регламента технического обслуживания летательных аппаратов.

На заключительном этапе результаты фактически проведенных диагностических и обслуживающих мероприятий возвращаются в информационную систему. Это позволяет уточнять прогнозные зависимости, выявлять систематические ошибки и постепенно совершенствовать методику применительно к конкретному типу авиационной техники.

Важным элементом алгоритма является проверка достоверности информации. При недостаточном качестве данных либо отсутствии подтвержденной прогностической модели необходимо использовать действующий регламент технического обслуживания и предусмотренные им диагностические процедуры.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Расчетный пример формирования индивидуального интервала обслуживания

Для иллюстрации работы предлагаемой методики рассмотрим два условных летательных аппарата одного типа, эксплуатируемых с различной интенсивностью и в неодинаковых условиях окружающей среды.

Предположим, что оба летательных аппарата после предыдущего технического обслуживания имеют одинаковую фактическую наработку — 60 часов.

Установленный в условиях расчетного примера базовый межрегламентный интервал составляет 100 часов. Следовательно, при традиционном планировании до очередного обслуживания каждого летательного аппарата остается 40 часов.

Однако анализ эксплуатационных данных показывает, что первый летательный аппарат работал преимущественно в условиях повышенной нагруженности и

ISSN: 2224-6878 | Pakistan Volume 6, No. 10.

IF: 14.91 | 2026 http://waerasia.org/index.php/ijtar

запыленности, тогда как второй эксплуатировался в относительно благоприятных условиях.

Для первого летательного аппарата условный коэффициент эквивалентной нагруженности принимается равным 1,20, для второго — 0,95. Указанные коэффициенты используются исключительно для демонстрации расчетного алгоритма.

На основании формулы (4) получаем:

Для первого летательного аппарата:

$$T_{eq,1}=60\cdot 1{,}20=72 \text{ ч.} \quad (11)$$

Для второго летательного аппарата:

$$T_{eq,2}=60\cdot 0{,}95=57 \text{ ч.} \quad (12)$$

В демонстрационной модели примем порог эквивалентной наработки равным 100 эквивалентным часам. Это условный исследовательский критерий, а не установленное изготовителем ресурсное ограничение.

При сохранении коэффициентов нагруженности в прогнозируемом периоде оставшийся интервал по эквивалентной наработке составит:

$$\Delta T_{eq,1}=\frac{100-72}{1{,}20}=23{,}3 \text{ ч.} \quad (13)$$

$$\Delta T_{eq,2}=\frac{100-57}{0{,}95}=45{,}3 \text{ ч.} \quad (14)$$

Дополнительно предположим, что консервативный прогноз остаточного ресурса контролируемого агрегата составляет 36 часов для первого летательного аппарата и 80 часов для второго. Примем коэффициент $\gamma=0{,}8$.

Тогда ограничение по прогнозируемому остаточному ресурсу составит:

$$\Delta T_{RUL,1}=0{,}8\cdot 36=28{,}8 \text{ ч.} \quad (15)$$

$$\Delta T_{RUL,2}=0{,}8\cdot 80=64 \text{ ч.} \quad (16)$$

При отсутствии более жестких диагностических ограничений индивидуальные интервалы определяются следующим образом:

$$\Delta T_{ad,1}=\min(40;23{,}3;28{,}8)=23{,}3 \text{ ч.} \quad (17)$$

$$\Delta T_{ad,2}=\min(40;45{,}3;64)=40 \text{ ч.} \quad (18)$$

Полученные результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2. Сравнение расчетных показателей технического обслуживания двух условных летательных аппаратов

Показатель	ЛА № 1	ЛА № 2
Фактическая наработка, ч	60	60
Условный коэффициент нагруженности	1,20	0,95
Эквивалентная наработка, ч	72	57
Остаток базового регламентного интервала, ч	40	40
Нижняя оценка RUL, ч	36	80

ISSN: 2224-6878 | Pakistan Volume 6, No. 10.

IF: 14.91 | 2026 http://waerasia.org/index.php/ijtar

Показатель	ЛА № 1	ЛА № 2
Интервал по эквивалентной наработке, ч	23,3	45,3
Расчетный адаптивный интервал, ч	23,3	40
Рекомендуемое решение	Досрочный диагностический контроль	Обслуживание по действующему регламенту

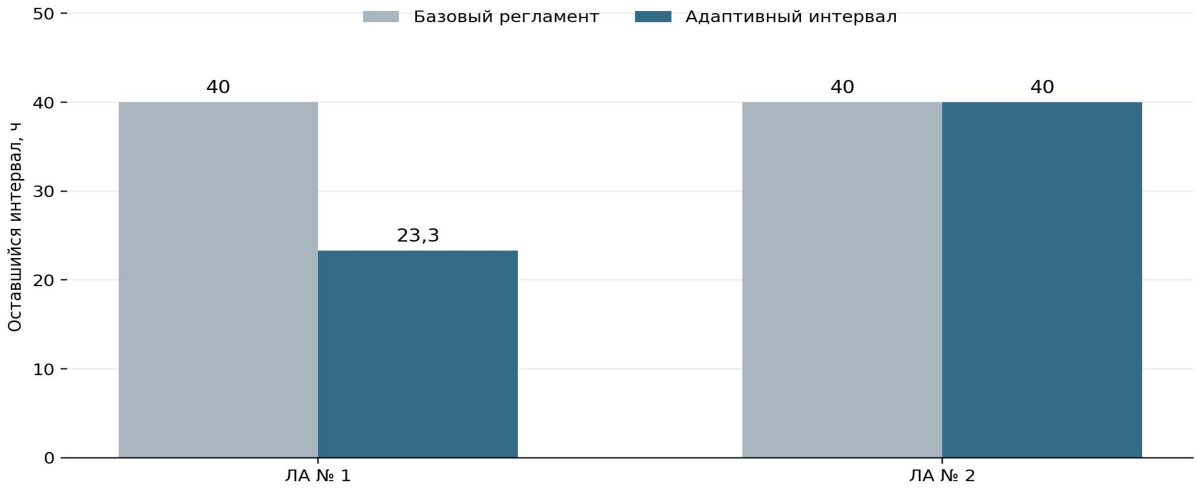


Рисунок 2. Сопоставление традиционного и адаптивного интервалов технического обслуживания в условном расчетном примере.

Анализ результатов показывает, что при одинаковой фактической наработке различия в эксплуатационной нагруженности и прогнозируемом остаточном ресурсе приводят к формированию неодинаковых рекомендаций по срокам технического обслуживания.

Для первого летательного аппарата расчетная величина адаптивного интервала составляет 23,3 часа, что на 16,7 часа, или приблизительно на 41,8 %, меньше остатка базового регламентного интервала.

Это означает необходимость более раннего диагностического контроля и, при подтверждении соответствующих признаков деградации, выполнения предусмотренных технических мероприятий.

Для второго летательного аппарата расчетные показатели допускают сохранение исходного межрегламентного интервала без дополнительного досрочного вмешательства.

Результаты иллюстрируют принцип индивидуального назначения сроков технических мероприятий.

Следует подчеркнуть, что приведенные значения являются модельными, а не результатом эксплуатационных испытаний. Полученное сокращение интервала на 41,8 % характеризует только расчетную разницу сроков и не означает доказанного сокращения отказов, затрат или увеличения технической готовности.

3.2. Совершенствование процесса планирования технического обслуживания

Предлагаемая методика позволяет сформировать дифференцированную систему планирования технического обслуживания, в которой техническое решение определяется сочетанием диагностического состояния и прогнозируемой эксплуатационной нагрузки.

В зависимости от результатов мониторинга могут формироваться следующие решения:

ISSN: 2224-6878 | Pakistan Volume 6, No. 10.

IF: 14.91 | 2026 http://waerasia.org/index.php/ijtar

Таблица 3. Варианты технических решений по результатам мониторинга

Состояние контролируемого объекта	Характеристика	Рекомендуемое действие
Стабильное	Параметры находятся в допустимых пределах, неблагоприятных тенденций не выявлено	Продолжение эксплуатации в пределах действующего регламента
Умеренное ухудшение	Наблюдается устойчивая тенденция изменения диагностических параметров	Усиленный мониторинг и уточнение прогноза
Ускоренная деградация	Темп изменения параметров или прогноз RUL указывает на необходимость более раннего вмешательства	Досрочная диагностика и планирование технического обслуживания
Предельное или недопустимое состояние	Выявлено превышение обязательных ограничений или нарушение требований эксплуатационной документации	Выполнение установленных ограничительных и восстановительных мероприятий

Такая система способствует переходу от единого календарного планирования к индивидуальному управлению состоянием авиационной техники.

Однако окончательное решение о необходимости ремонта, допуске к эксплуатации и изменении установленной программы ТО должно приниматься уполномоченными специалистами в соответствии с действующей нормативно-технической документацией.

3.3. Использование цифрового паспорта технического состояния

Для обеспечения непрерывности мониторинга предлагается использовать цифровой паспорт индивидуального технического состояния летательного аппарата.

Цифровой паспорт представляет собой структурированную информационную модель, объединяющую сведения о наработке, диагностических параметрах, технических воздействиях, выявленных неисправностях и прогнозируемом состоянии контролируемых агрегатов.

Его информационная структура должна включать идентификационные сведения об объекте, историю эксплуатации, результаты диагностики, ресурсные показатели, параметры внешней среды и текущие прогнозные оценки.

Основное преимущество цифрового паспорта заключается в возможности прослеживания изменений технического состояния конкретного летательного аппарата на протяжении продолжительного периода эксплуатации.

При наличии нескольких летательных аппаратов одного типа цифровые паспорта позволяют одновременно решать две задачи: формировать индивидуальные рекомендации и получать обобщенную статистическую информацию для уточнения моделей надежности.

Сопоставление индивидуальных траекторий изменения технического состояния способствует выявлению факторов, наиболее существенно влияющих на интенсивность деградации оборудования.

Для авиационных подразделений, использующих летательные аппараты в различных климатических условиях, такая информация может применяться при планировании технических мероприятий, распределении ремонтных ресурсов и оценке потребности в запасных частях.

ISSN: 2224-6878 | Pakistan Volume 6, No. 10.

IF: 14.91 | 2026 http://waerasia.org/index.php/ijtar

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

4.1. Преимущества предлагаемой методики

Результаты проведенного теоретического исследования и условного расчетного примера позволяют выделить ряд потенциальных преимуществ предложенной методики формирования адаптивного регламента технического обслуживания.

Прежде всего, индивидуальная оценка технического состояния позволяет отказаться от представления о том, что одинаковая фактическая наработка обязательно соответствует одинаковому уровню деградации авиационной техники.

Использование эквивалентной наработки создает предпосылки для учета эксплуатационных воздействий, которые не отражаются непосредственно в количестве часов налета. При этом включение диагностических показателей позволяет уточнять расчетную оценку нагруженности с учетом фактически наблюдаемых изменений технического состояния.

Дополнительным преимуществом является возможность прогнозирования потребности в обслуживании. Если техническое состояние агрегата характеризуется устойчивой тенденцией деградации, прогноз RUL может использоваться для заблаговременного планирования диагностики, подготовки запасных частей и распределения ремонтных ресурсов.

Особую значимость такой подход приобретает для авиационных подразделений, эксплуатирующих технику в различных климатических условиях.

Вместе с тем эффективность адаптивного регламента зависит от достоверности диагностических данных, корректности моделей повреждаемости, полноты истории эксплуатации и устойчивости прогнозов при изменении внешних условий.

В исследованиях Salinas-Camus, Goebel и Eleftheroglou (2025) подчеркивается необходимость оценки прогностических моделей не только по точности, но и по неопределенности, устойчивости, интерпретируемости и практической реализуемости [3].

Следовательно, внедрение адаптивного регламента должно сопровождаться формированием системы контроля качества диагностических и прогнозных решений.

4.2. Оценка технической и экономической эффективности

Для определения практической эффективности предлагаемой методики необходимо проводить сравнительный анализ традиционной и адаптивной систем планирования технического обслуживания.

В качестве основных критериев оценки предлагается использовать коэффициент технической готовности, удельную трудоемкость обслуживания, количество внеплановых отказов, продолжительность простоев и затраты на поддержание исправного состояния авиационной техники.

Коэффициент технической готовности может оцениваться по выражению:

$$K_{тг}=\frac{T_{испр}}{T_{испр}+T_{неиспр}}. \quad (19)$$

где $T_{испр}$ — суммарное время нахождения летательного аппарата в исправном состоянии; $T_{неиспр}$ — суммарное время нахождения в неисправном состоянии за рассматриваемый период.

При практической оценке необходимо заранее установить единые правила учета времени, чтобы сравнение двух систем обслуживания было корректным.

Изменение коэффициента технической готовности после применения предлагаемой методики определяется зависимостью:

ISSN: 2224-6878 | Pakistan Volume 6, No. 10.

IF: 14.91 | 2026 http://waerasia.org/index.php/ijtar

$$\Delta K_{тг}=K_{тг,ад}-K_{тг,баз}. \quad (20)$$

где $K_{тг,ад}$ — коэффициент технической готовности при использовании адаптивной методики; $K_{тг,баз}$ — коэффициент технической готовности при традиционном подходе.

Относительное изменение удельных затрат на техническое обслуживание предлагается оценивать по формуле:

$$E_C=\frac{C_{баз}-C_{ад}}{C_{баз}}\cdot 100\%. \quad (21)$$

где $C_{баз}$ — удельные затраты на техническое обслуживание при традиционном подходе; $C_{ад}$ — удельные затраты при использовании адаптивного регламента.

Положительное значение показателя E_C характеризует снижение удельных затрат, отрицательное — их увеличение.

Для обеспечения объективности расчетов затраты необходимо определять на одинаковую единицу эксплуатации, например на один час налета, с учетом трудоемкости обслуживания, простоев, расходных материалов, запасных частей и затрат на функционирование системы мониторинга.

Вместе с тем экономическая эффективность не может рассматриваться отдельно от безопасности полетов. Снижение затрат допустимо только при условии выполнения установленных требований надежности, исправности и летной годности авиационной техники.

4.3. Направления экспериментальной проверки методики

Для подтверждения практической применимости предложенных математических зависимостей требуется проведение экспериментальных исследований с использованием реальных эксплуатационных данных.

В качестве первоначальной информационной базы могут использоваться открытые наборы данных NASA Prognostics Center of Excellence, включая моделируемые траектории деградации авиационных двигателей C-MAPSS [8].

Однако данные моделирования не могут полностью воспроизвести особенности эксплуатации конкретного типа авиационной техники в реальных климатических условиях.

Поэтому экспериментальная проверка должна включать последовательное решение следующих задач:

1. Сбор и систематизацию индивидуальных эксплуатационных данных по группе летательных аппаратов одного типа.
2. Идентификацию влияния температурных, пылевых и нагрузочных факторов на диагностические характеристики основных агрегатов.
3. Определение коэффициентов модели эквивалентной наработки.
4. Обучение и проверку моделей прогнозирования остаточного ресурса с оценкой погрешности и неопределенности.
5. Сравнение рекомендаций адаптивного алгоритма с фактическими результатами диагностики и действующим регламентом.
6. Оценку изменений технической готовности, трудоемкости обслуживания и частоты внеплановых отказов.

При проверке прогностических моделей необходимо исключить использование будущих эксплуатационных данных в процессе формирования прогноза. Разделение исходной информации на обучающую и проверочную выборки целесообразно выполнять с

ISSN: 2224-6878 | Pakistan Volume 6, No. 10.

IF: 14.91 | 2026 http://waerasia.org/index.php/ijtar

учетом хронологии эксплуатации и индивидуальной принадлежности записей к конкретным летательным аппаратам.

Важнейшими критериями качества прогнозирования являются средняя абсолютная ошибка RUL, доля фактических значений, находящихся внутри предсказательных интервалов, и частота случаев чрезмерно оптимистичного прогноза остаточного ресурса.

Отдельной задачей является оценка устойчивости методики при изменении условий эксплуатации и неполноте диагностических данных.

Практическое внедрение следует начинать с рекомендательного режима, когда результаты адаптивного алгоритма используются специалистами для дополнительного анализа, но не изменяют автоматически установленный порядок технического обслуживания.

5. НАУЧНАЯ НОВИЗНА И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

Предлагаемое методическое совершенствование заключается в объединении индивидуального мониторинга технического состояния, оценки эксплуатационной нагруженности, климатически обусловленной деградации и вероятностного прогноза остаточного ресурса в единую процедуру формирования рекомендаций по техническому обслуживанию.

В отличие от подходов, рассматривающих календарную наработку, диагностическое состояние или остаточный ресурс преимущественно как самостоятельные критерии, предлагаемая модель предусматривает их совместное использование при определении индивидуального межконтрольного интервала.

Основные элементы предлагаемого методического решения состоят в следующем:

разработана структура комплексной оценки индивидуального технического состояния на основе нормированных диагностических параметров;

предложена модель определения эквивалентной наработки с учетом нагрузочных, температурных, пылевых и циклических воздействий;

сформулирована зависимость для определения адаптивного интервала технического обслуживания с учетом ограничений по эквивалентной наработке, прогноза RUL и действующего регламента;

предложен алгоритм последовательного преобразования диагностической информации в рекомендации по техническому обслуживанию с механизмом обратной связи.

При этом отдельные компоненты подхода, включая прогнозирование RUL, учет неопределенности и оптимизацию технического обслуживания, уже исследуются в современной научной литературе. Поэтому научная новизна предлагаемой методики требует дальнейшего подтверждения посредством сравнения с существующими интегрированными моделями и количественной экспериментальной проверки.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных методических положений при создании автоматизированных систем мониторинга технического состояния авиационной техники, разработке цифровых паспортов летательных аппаратов и совершенствовании процессов планирования технического обслуживания.

Для авиационной техники, эксплуатируемой в условиях жаркого и засушливого климата, перспективным является применение разработанной методики для учета индивидуального воздействия высоких температур, пылевых загрязнений и переменных эксплуатационных нагрузок.

ISSN: 2224-6878 | Pakistan Volume 6, No. 10.

IF: 14.91 | 2026 http://waerasia.org/index.php/ijtar

В дальнейшем предлагаемый подход может быть адаптирован к конкретным типам летательных аппаратов и их системам при наличии соответствующих диагностических данных, достоверных моделей изменения технического состояния и нормативного обоснования допустимых технических решений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования рассмотрена возможность совершенствования методики формирования адаптивного регламента технического обслуживания летательных аппаратов на основе мониторинга индивидуального технического состояния.

На основании проведенного анализа сформулированы следующие выводы.

1. Установлено, что применение исключительно фиксированных межрегламентных интервалов не позволяет в полной мере отражать различия в эксплуатационной нагруженности и индивидуальной деградации отдельных летательных аппаратов. Это обосновывает необходимость дополнения традиционного технического обслуживания методами индивидуального мониторинга и прогнозирования технического состояния.

2. Предложена комплексная методика оценки технического состояния, предусматривающая совместный анализ диагностических параметров, фактической и эквивалентной наработки, эксплуатационных режимов и климатических воздействий. Такой подход позволяет формировать более детализированную информационную основу для принятия решений по техническому обслуживанию.

3. Разработана расчетная модель определения адаптивного интервала технического обслуживания, учитывающая остаток нормативного межрегламентного интервала, эквивалентную наработку, прогноз остаточного ресурса и результаты диагностики. Модель предусматривает приоритет обязательных эксплуатационных ограничений и не предполагает их автоматического увеличения.

4. На условном расчетном примере продемонстрировано, что при одинаковой фактической наработке летательных аппаратов различия в коэффициентах эксплуатационной нагруженности и прогнозируемом остаточном ресурсе приводят к неодинаковым рекомендуемым срокам проведения технических мероприятий. Для одного из рассматриваемых объектов расчетный интервал до досрочного контроля составил 23,3 часа вместо 40 часов по базовому регламенту.

5. Обоснована целесообразность формирования цифрового паспорта индивидуального технического состояния, обеспечивающего накопление эксплуатационной информации, анализ изменения диагностических параметров и уточнение прогностических моделей на протяжении жизненного цикла авиационной техники.

6. Определены основные направления дальнейших исследований, включающие идентификацию коэффициентов климатической и эксплуатационной нагруженности, повышение точности прогнозирования RUL, экспериментальную проверку предложенной методики и сравнительную оценку эффективности традиционной и адаптивной систем технического обслуживания.

Таким образом, предложенная методика формирует основу для совершенствования управления техническим обслуживанием летательных аппаратов путем перехода от преимущественно усредненного планирования к индивидуализированному принятию технических решений на основе фактического состояния авиационной техники.

Дальнейшее развитие данного направления может способствовать повышению обоснованности технических решений, рациональному использованию ресурса агрегатов,

ISSN: 2224-6878 | Pakistan Volume 6, No. 10.

IF: 14.91 | 2026 http://waerasia.org/index.php/ijtar

совершенствованию организации технической эксплуатации и поддержанию требуемого уровня готовности авиационной техники.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sun J., Wang Z., Yan H., Li Z., Duan S., Hu H., Zuo H. Research advances in aircraft predictive maintenance // Acta Aeronautica et Astronautica Sinica. — 2025. — Vol. 46, No. 7. — DOI: 10.7527/S1000-6893.2024.30852.
2. Chia J. W. Y., Verhagen W. J. C., Silva J. M., Cole I. S. A review and outlook of airframe digital twins for structural prognostics and health management in the aviation industry // Journal of Manufacturing Systems. — 2024. — Vol. 77. — P. 398–417. — DOI: 10.1016/j.jmsy.2024.09.024.
3. Salinas-Camus M., Goebel K., Eleftheroglou N. A comprehensive review and evaluation framework for data-driven prognostics: Uncertainty, robustness, interpretability, and feasibility // Mechanical Systems and Signal Processing. — 2025. — Vol. 237. — Article 113015. — DOI: 10.1016/j.ymssp.2025.113015.
4. Robinson C. Remaining Useful Life Estimation for Aircraft Engines with Risk-Aware Prediction Intervals via Conformalized Quantile Regression // International Journal of Prognostics and Health Management. — 2026. — Vol. 17, No. 1. — DOI: 10.36001/ijphm.2026.v17i1.4724.
5. Ryder C. L., Bézier C., Dacre H. F. et al. Aircraft engine dust ingestion at global airports // Natural Hazards and Earth System Sciences. — 2024. — Vol. 24. — P. 2263–2288. — DOI: 10.5194/nhess-24-2263-2024.
6. Li C., Li Y., Bin G., Luo D., Li J., Long L. Effect of sand concentration on the erosion damage of aero-compressor blades in harsh operating environment // Powder Technology. — 2026. — DOI: 10.1016/j.powtec.2026.122385.
7. Wang L., Chen Y., Zhu Z., Zhao X. Dynamic predictive maintenance framework for mechanical systems via uncertainty-aware RUL estimation // Mechanical Systems and Signal Processing. — 2026. — Vol. 247. — Article 113977. — DOI: 10.1016/j.ymssp.2026.113977.
8. Saxena A., Goebel K. Turbofan Engine Degradation Simulation Data Set. — NASA Ames Research Center, Prognostics Data Repository, 2008. — https://www.nasa.gov/intelligent-systems-division/discovery-and-systems-health/pcoe/pcoe-data-set-repository/.
9. ISO 17359:2018. Condition monitoring and diagnostics of machines — General guidelines. — International Organization for Standardization, 2018. — https://www.iso.org/standard/71194.html.
10. ISO 13374-1:2003. Condition monitoring and diagnostics of machines — Data processing, communication and presentation — Part 1: General guidelines. — International Organization for Standardization, 2003. — https://www.iso.org/standard/21832.html.
11. ISO 13381-1:2025. Condition monitoring and diagnostics of machine systems — Prognostics — Part 1: General guidelines and requirements. — International Organization for Standardization, 2025. — https://www.iso.org/standard/88029.html.
12. Federal Aviation Administration. AC 120-17B. Reliability Program Methods — Standards for Determining Time Limitations. — 2018. — Editorial Update: July 9, 2026. — https://www.faa.gov/regulations_policies/advisory_circulars/index.cfm/go/document.information/documentid/1035253.