

ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫЕ СИСТЕМЫ ПРЕДИКТИВНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ АВИАДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ОБЪЯСНИМОГО ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

HUMAN-MACHINE SYSTEMS FOR PREDICTIVE MAINTENANCE OF AIRCRAFT ENGINES BASED ON EXPLAINABLE ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Балтрукович Петр Иванович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инженерной психологии и эргономики учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Республика Беларусь
p.baltrukovich@bsuir.by

Лапцевич Александр Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных радиотехнологий учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Республика Беларусь
a.laptsevich@bsuir.by

Petr Baltrukovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Engineering Psychology and Ergonomics of the educational institution "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics", Republic of Belarus
p.baltrukovich@bsuir.by

Alexander Laptsevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Radio Technologies of the educational institution "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics", Republic of Belarus
a.laptsevich@bsuir.by

Аннотация: в статье исследуются перспективы развития человеко-машинных систем для предиктивного технического обслуживания авиационных двигателей с применением объяснимого искусственного интеллекта. Основное внимание уделяется перспективным методикам создания интеллектуальных систем поддержки принятия решений, обеспечивающим эффективное взаимодействие между специалистами и алгоритмами машинного обучения. Человеко-машинные системы предиктивного обслуживания позволяют оптимально распределить функции между автоматикой и специалистами. Одним из перспективных направлений является разработка цифровых двойников авиадвигателей, интегрированных в человеко-машинные системы предиктивного технического обслуживания на основе объяснимого искусственного интеллекта. Получаемые результаты могут интегрироваться в систему предиктивного обслуживания, формируя рекомендации по оптимальным межремонтным интервалам и необходимым конструктивным доработкам. В целом такие системы позволяют эффективно сочетать когнитивные способности человека-оператора с аналитическими возможностями искусственного интеллекта. Практика визуализации значимых параметров и логики принятия решений повышает готовность технического персонала следовать рекомендациям системы. Результаты исследования подтверждают возможность практической реализации таких систем в авиационной отрасли для повышения качества и надежности технического обслуживания.

Ключевые слова: человеко-машинные системы, предиктивное техническое обслуживание, авиационные двигатели, объяснимый искусственный интеллект.

Abstract: the article examines the prospects for the development of human-machine systems for predictive maintenance of aircraft engines using explainable artificial intelligence. The main focus is on promising methods for creating intelligent decision support systems that ensure effective interaction between specialists and machine learning algorithms. Human-machine predictive maintenance systems allow for the optimal distribution of functions between automation and specialists. One promising area is the development of digital twins of aircraft engines integrated into human-machine predictive maintenance systems based on explainable artificial intelligence. The results obtained can be integrated into a predictive maintenance system, generating recommendations for optimal repair intervals and necessary design modifications. General, such systems make it possible to effectively combine the cognitive abilities of a human operator with the analytical capabilities of artificial intelligence. The practice of visualizing significant parameters and decision-making logic increases the readiness of technical personnel to follow the system's recommendations. The results of the study confirm the possibility of practical implementation of such systems in the aviation industry to improve the quality and reliability of maintenance.

Keywords: : human-machine systems, predictive maintenance, aircraft engines, explainable artificial intelligence.

Введение

Актуальность темы обусловлена важностью обеспечения безотказности авиационных двигателей при одновременном росте сложности их конструкции.

Современные двигатели генерируют огромные массивы телеметрических данных, которые человеку становится невозможно анализировать вручную без интеллектуальных систем поддержки. Однако в настоящее время технологии искусственного интеллекта (ИИ) вызывают некоторое недоверие у технического персонала, что ограничивает их внедрение. Решение этой проблемы через объяснимый ИИ (XAI, eXplainable AI) позволяет сохранить контроль специалистов над критически важными решениями, повысить точность диагностики за счет синергии человеческого опыта и возможностей машинного обучения, а также обеспечить плавную цифровую трансформацию организаций, обслуживающих авиадвигатели. Особую значимость это приобретает в свете ужесточения экологических норм и требований к ресурсу авиадвигателей.

Проблемные вопросы, связанные с авиадвигателями, возникающие на современном этапе

Авиационный двигатель является ключевым элементом летательного аппарата (ЛА), в значительной мере определяющим его надежность, эффективность и безопасность, в связи с чем к нему предъявляются жесткие, порой противоречивые комплексные требования, охватывающие технические, экологические и экономические аспекты [1 – 3].

Современные двигатели представляют собой сложные инженерные системы, объединяющие передовые технологии в области материаловедения, аэродинамики и цифрового управления. Их работа происходит в экстремальных условиях — при высоких температурах, давлениях и механических нагрузках, что предъявляет серьезные требования на безотказную работу каждой составляющей двигателя.

Несмотря на пристальное внимание конструкторов и обслуживающего персонала, направленное на обеспечение надежной работы авиадвигателей, статистика показывает, что значительная часть авиационных происшествий связана именно с отказами силовой установки [4].

Согласно анализу отчетов Межгосударственного авиационного комитета (МАК), в гражданской авиации государств — участников

Соглашения о гражданской авиации в период с 2007 по 2020 г. произошло 473 авиационных происшествия, из них 73 — из-за отказа или повреждения двигателя, в том числе 28 катастроф с гибелью 257 человек [5, 6].

По данным Европейского агентства безопасности полетов (EASA, European Union Aviation Safety Agency) за период 2019 – 2023 года почти 10 % серьезных инцидентов, произошедших с коммерческими воздушными судами, выполняющими пассажирские и грузовые перевозки на самолетах с максимальной сертифицированной взлетной массой, превышающей 5700 кг или оснащенных турбовентиляторным двигателем(ями) или более чем одним турбовинтовым двигателем, вызваны проблемами в работе двигателей. Общее число летных происшествий, произошедших за указанный период составляет 334 случая [7]. При этом количество происшествий, явившихся результатом отказов (неисправностей) по отдельным категориям причин в порядке убывания представлены в таблице 1, где мы видим, что происшествия по причинам, связанным с двигателем, входят в число первых трех.

Практика показывает, что к основным причинам, приводящим к отказам двигателей, можно отнести

Таблица 1 — Количество происшествий, явившихся результатом отказов (неисправностей) по отдельным категориям причин

№	Причина происшествия	Число происшествий	Процентное соотношение от общего количества
1.	Системы / компоненты (не силовой установки)	61	18,2
2.	Потеря эшелонирования/ столкновения воздушных судов в воздухе	43	12,8
3.	Силовая установка и ее компоненты	33	9,9
4.	Столкновение при рулении	24	7,2
5.	Происшествия во время (в результате) наземного обслуживания	24	7,2
6.	Выезд за пределы взлетно-посадочной полосы (ВПП)	23	6,9
7.	Возгорание, не являющееся результатом воздействия	22	6,6
8.	Несанкционированный выезд / выход на ВПП другого ЛА (транспортного средства, человека)	17	5,1
9.	Другое	17	5,1
10.	Управление воздушным движением	16	4,8
11.	Ненормальный контакт с ВПП	15	4,5
12.	Ошибки навигации	15	4,5
13.	Влияние турбулентности в полете	14	4,2
14.	Медицинские показатели	10	3,0

конструкционные недоработки, производственные дефекты и ошибки эксплуатации. Это подчеркивает необходимость дальнейшего совершенствования конструкций авиационных двигателей, технологии их производства и методов технического обслуживания.

Кроме того, важной проблемой является растущий объем данных, генерируемых системами мониторинга двигателя. Так, двигатель фирмы Pratt & Whitney PW1000G имеет около 5000 датчиков, способных генерировать до 10 ГБ данных в секунду. Один двухдвигательный самолет со средним временем полета 12 часов может выдавать до 844 ТБ данных, которые можно использовать для обнаружения неисправностей, как только они появляются [8]. При этом такие системы диагностики часто выдают результаты без объяснения логики принятия решений, что снижает доверие технического персонала.

Особую сложность представляет диагностика скрытых дефектов. Как показывает практика, значительная часть отказов двигателей связана с постепенным развитием микротрещин, которые трудно обнаружить стандартными методами. Более того, вопрос диагностирования повреждений лопаток турбин в режиме полета малоизучен, а мониторинг трещин в турбинных лопатках, как правило, проводится при условии неработающего двигателя [9].

Еще одной значимой проблемой является человеческий фактор. При этом современные системы поддержки принятия решений нередко игнорируют необходимость адаптации интерфейсов под психофизиологические особенности операторов.

Оценка возможностей применения систем предиктивного технического обслуживания авиадвигателей на основе объяснимого искусственного интеллекта

В последние 10–15 лет, благодаря росту скорости работы компьютеров, объема вычислений и доступной информации, технологии ИИ развиваются с беспрецедентной скоростью. Перспективным направлением в авиационной индустрии является применение систем предиктивного технического обслуживания. В качестве примера в таблице 2 представлены результаты, касающиеся вопроса повышения безопасности полетов, полученные авиакомпанией при внедрении такой системы [10].

Данные, приведенные в таблице, свидетельствуют о высоком потенциале применения систем предиктивного технического обслуживания в авиации.

Таблица 2 — Результаты повышения безопасности полетов после предиктивного технического обслуживания

Показатель	До предиктивного обслуживания	После предиктивного обслуживания
Инциденты, связанные с безопасностью (случаев в год)	50	10
Задержки, связанные с техническим обслуживанием (в %)	20	5

В этой связи обоснованным является исследование путей решения указанных и других проблемных вопросов, связанных с надежностью авиадвигателей, через внедрение человеко-машинных систем предиктивного технического обслуживания (Predictive Maintenance, PdM) [11]. Практика эксплуатации сложных систем, в том числе авиационных двигателей, демонстрирует, что современные методы предиктивного мониторинга технического состояния позволяют осуществить переход от существующих стратегий обслуживания к принципиально новому подходу [12, 13].

Традиционная схема, основанная на реактивном обслуживании (когда ремонт выполняется после возникновения неисправности или отказа), а также жестко регламентированное профилактическое обслуживание (плановые работы по установленному графику независимо от фактического состояния агрегатов) могут быть заменены интеллектуальными системами прогнозного технического обслуживания. Однако технические специалисты могут не доверять результатам, если они не в полной мере понимают, на основе каких критериев были сделаны выводы. Это поднимает вопрос о необходимости разработки объяснимых моделей ИИ (XAI), которые могут предоставлять понятные объяснения своих решений и позволяют преодолеть существующие барьеры в принятии решений техническим персоналом в системе человек — машина.

Технологии SHAP (Shapley Additive Explanations) и LIME (Local Interpretable Model-agnostic Explanations) в дополнение позволяют создавать прозрачные модели, объясняющие логику диагностики на понятном техническому персоналу языке. Это может быть полезно при прогнозировании отказов двигателей, анализе данных сенсоров и оптимизации производственных процессов, что особенно важно для гибридных систем, где окончательное решение остается за специалистом.

Основные возможности таких комплексных систем наиболее проявляются в трех аспектах:

1. Анализ данных в реальном времени с использованием алгоритмов машинного обучения позволяет выявлять скрытые закономерности в работе двигателей.

2. Технологии объяснимого ИИ, такие как SHAP и LIME, решают проблему доверия к автоматизированным системам. Практика визуализации значимых параметров и логики принятия решений повышает готовность технического персонала следовать рекомендациям системы. Это особенно важно для критически важных решений, где окончательное слово должно оставаться за человеком.

3. Человеко-машинные системы предиктивного обслуживания позволяют оптимально распределить функции между автоматикой и специалистами.

Исходя из изложенного, одним из перспективных направлений является разработка цифровых двойников авиадвигателей, интегрированных в человеко-машинные системы предиктивного технического обслуживания на основе объяснимого искусственного интеллекта. Так, в Центральном институте авиационного моторостроения им. П. И. Баранова совместно с разработчиком и производителем авиационных двигателей АО «ОДК-Климов» разработан цифровой двойник установки для испытаний центробежного компрессора малоразмерного газотурбинного двигателя для определения изменения величины зазоров в газодинамическом тракте компрессора по расчетному полетному циклу [14]. Цифровой двойник создает ус-

ловия для комплексного анализа и прогнозирования изменения величины зазоров в газодинамическом тракте компрессора на протяжении всего расчетного полетного цикла, обеспечивая тем самым новый уровень контроля и оптимизации рабочих характеристик двигателя.

Технология цифровых двойников также применяется для создания силовой установки ТВ7-117СТ-01 самолета Ил-114-300 [15] и двигателя АИ 222-25 для учебных самолетов Як-130 [16]. А специалисты Центрального института авиационного моторостроения имени П. И. Баранова уже разработали предварительный национальный стандарт по цифровым двойникам авиационных газотурбинных двигателей. Предварительный национальный стандарт «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники авиационных газотурбинных двигателей. Общие положения» введен в действие приказом Росстандарта с 1 января 2025 г. [17].

В целом такие системы позволяют эффективно сочетать когнитивные способности человека-оператора с аналитическими возможностями искусственного интеллекта, создавая симбиотическую среду для принятия оптимальных решений. Получаемые результаты могут интегрироваться в систему предиктивного обслуживания, формируя рекомендации по оптимальным межремонтным интервалам и необходимым конструктивным доработкам.

Подобные системы не ограничиваются прогнозированием возможных отказов. Они, как правило, предусматривают активное взаимодействие с техническим персоналом. В этом случае, алгоритм предлагает несколько вариантов действий с подробным объяснением каждого, а специалист выбирает оптимальное решение, исходя из своего опыта и текущей ситуации.

Одной из наиболее перспективных является методика многоуровневой интерпретации решений с использованием SHAP-анализа, которая нашла применение в диагностике подшипников турбореактивных двигателей. Подход, описанный в работе [18], позволяет визуализировать вклад вибрационных сигналов в прогноз износа подшипников и включить его в итоговый прогноз модели.

Технологии предиктивного обслуживания в авиационной отрасли нередко включают в себя использо-

вание визуализации данных для улучшения процессов диагностики и обслуживания авиационных двигателей. Особенностью таких систем является визуальная информация, позволяющая специалистам принять корректное и своевременное решение. Такой интерактивный подход не только повышает доверие к системе, но и способствует более глубокому пониманию работы авиадвигателей.

Однако внедрение указанных технологий сталкивается с рядом вызовов. Основные проблемы включают необходимость интеграции с устаревшими системами. Кроме того, возникают новые требования к качеству и объему обучающих данных. Возникает также необходимость преодоления нормативных барьеров, поскольку существующие стандарты в большинстве своем не учитывают специфику решений на основе ИИ. Кроме того, требует внимания экономический аспект. Практика показывает необходимость проведения первоначальных инвестиций в инфраструктуру и обучение персонала, что особенно актуально для региональных перевозчиков.

Вместе с тем имеющийся опыт демонстрирует, что поэтапное внедрение с фокусом на объяснимость решений и обучение персонала дает наилучшие результаты.

Заключение

Таким образом, применение человеко-машинных систем предиктивного технического обслуживания авиадвигателей на основе объяснимого ИИ открывает значительные перспективы для авиационной отрасли в целом и производства и технического обслуживания двигателей в частности.

Дальнейшее развитие методик предиктивного технического обслуживания авиадвигателей на основе объяснимого искусственного интеллекта потребует решения ряда задач, включая обучение персонала работе с новыми инструментами, адаптацию нормативной базы и разработку адаптированных интерфейсов, но их потенциал для повышения надежности и эффективности технического обслуживания авиадвигателей не вызывает сомнений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Палкин, В. А. Работы ведущих авиадвигательостроительных компаний в обеспечение создания перспективных авиационных двигателей (аналитический обзор) / под общей ред. В. А. Скибина и В. И. Солониной. – М.: ЦИАМ, 2010. – 678 с.
- Пучко, Н. И. Теория авиационных двигателей. Входные устройства и компрессоры турбовальных ГТД / Н. И. Пучко, Э. К. Бересневич, И. М. Гончаров. – Минск: БГАА, 2022. – 104 с.
- Гордин, М. В. Концепции авиационных двигателей для перспективных пассажирских самолетов / М. В. Гордин, В. А. Палкин // Авиационные двигатели. – 2019. – № 3 (4). – С. 7–16.
- Дьячков, Д. В. Анализ статистики авиакатастроф на основе исследования множества факторов / Д. В. Дьячков, О. В. Золотарев // Физико-техническая информатика (СРТ2020): 8 Международная конференция, Пушино, 9–13 ноября 2020 г. / ИТЭБ РАН. – Пушино, 2020. – Ч. 2. – С. 289–320.
- Мецкер, А. А. Применение интеллектуальных материалов для диагностики авиационных двигателей с учетом современных тенденций / А. А. Мецкер, О. Ф. Машошин // Наука, Техника. Человек: исторические, мировоззренческие и методологические проблемы: сборник материалов конференции, Москва, 23 ноября 2023 г. / МГТУ ГА; редкол.: Б. П. Елисеев (гл. ред.) [и др.]. – Москва, 2023 – Т. 1, № 13. – С. 360–364.
- Дмитриев, С. А. Анализ отказов и повреждений авиационных двигателей за период 2007–2020 гг. / С. А. Дмитриев, Е. С. Симонова // Надежность и качество сложных систем. – 2023. – № 1. – С. 81–90.
- Annual Safety Review 2024 / EASA. – Cologne, 2024. – 142 p.
- Никитенко, А. А. Влияние процессов цифровизации на развитие мирового рынка услуг по обеспечению летной годности гражданских самолетов / А. А. Никитенко // Российский внешнеэкономический вестник. – 2020. – № 5. – С. 53–59.
- Андреанов, И. К. Разработка подхода к обнаружению трещин в лопатках авиационных газотурбинных двигателей на рабочих режимах / И. К. Андреанов, М. С. Гринкруг, М. Кара Бали // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2024. – № 1. – С. 4–20.
- Smooth Sailing in the Sky: The Role of Predictive Maintenance in Aviation / Praxie: One Enterprise AI Platform. – URL: <https://praxie.com/predictive-maintenance-in-aviation/> (date of access: 05.04.2025).
- Кулида, Е. Л. Проблемы при применении методов машинного обучения в авиации / Е. Л. Кулида, В. Г. Лебедев // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2023): 16 международная конференция, Москва, 26–28 сентября 2023 г. / ИПУ РАН. – Москва, 2023. – С. 1315–1320.
- Соколов, М. Г. Information Technologies and Systems 2024 (ITS 2024) / М. Г. Соколов, М. А. Аксёненко, В. А. Захарьев // Материалы междунар. науч. конф., Минск, 20 ноября 2024 г. / редкол.: Л. Ю. Шилин [и др.]. – Минск: БГУИР, 2024. – С. 32–33.
- Сагдиев, Т. А. Анализ отказов авиационных двигателей / Т. А. Сагдиев, И. С. Матуразов, Н. А. Исаков // Вестник Академии гражданской авиации. – 2025. – № 1 (36). С. 10–18.
- Цифровой двойник установки для испытаний центробежного компрессора малоразмерного ГТД / Ю. М. Темис [и др.] // Авиационные двигатели. – 2021. – № 1 (10). – С. 5–16.

15. Ростех поделился опытом внедрения отечественных цифровых решений в авиаотрасли / Ростех. – URL: <https://rostec.ru/media/pressrelease/rostekh-podelilsya-opytom-vnedreniya-otechestvennykh-tsifrovyykh-resheniy-v-aviatrasli/> (дата обращения: 06.04.2025).
16. Ростех завершил разработку цифрового двойника авиационного двигателя АИ 222-25 / Ростех. – URL: <https://rostec.ru/upload/iblock/976/bilz7ea1i0i0qyj1cwjwqwf73d308qm5.pdf> (дата обращения: 06.04.2025).
17. ОДК внедряет новый отечественный стандарт по разработке цифровых двойников авиадвигателей / АО «Объединённая двигателестроительная корпорация». – URL: <https://www.uecrus.com/press/odk-vnedryaet-novyy-otechestvennyy-standart-po-razrabotke-tsifrovyykh-dvoynikov-aviadvigately/> (дата обращения: 06.04.2025).
18. Santos, M. R. SHapley Additive exPlanations (SHAP) for Efficient Feature Selection in Rolling Bearing Fault Diagnosis / M. R. Santos, A. Guedes, I. Sanchez-Gendríz // Machine Learning and Knowledge Extraction. – 2024. – V. 6, № 1. – P. 316–341.

REFERENCES

1. Palkin V. A. Works of leading aircraft engine manufacturing companies to ensure the creation of advanced aircraft engines (analytical review) / Under the general editorship of V. A. Skibin and V. I. Solonin. – M., CIAM, 2010, 678 p.
2. Puchko, N. I. Theory of aircraft engines. Inlet devices and compressors of turboshaft gas turbine engines / N. I. Puchko, E. K. Beresnevich, I. M. Goncharov. Minsk, BGAA, 2022, 104 p.
3. Gordin, M. V. Concepts of aircraft engines for advanced passenger aircraft / M. V. Gordin, V. A. Palkin // Aircraft engines, 2019, No. 3 (4), pp. 7–16.
4. Dyachkov, D. V. Analysis of air crash statistics based on a study of multiple factors / D. V. Dyachkov, O. V. Zolotarev // Eighth International Conference "Physical and Technical Informatics (CPT2020)", Pushchino, November 9–13, 2020 / ITEB RAS, Pushchino, 2020, Part 2, pp. 289–320.
5. Metzker, A. A. Application of intelligent materials for diagnostics of aircraft engines taking into account modern trends / A. A. Metzker, O. F. Mashoshin // Collection of materials of the conference "Science. Technology. Man: historical, ideological and methodological problems.", Moscow, November 23, 2023 / MSTU GA: editorial board: B. P. Eliseev (editor-in-chief) [et al.]. Moscow, 2023, Vol. 1, No. 13, pp. 360–364.
6. Dmitriev, S. A. Analysis of aircraft engine failures and damage for the period 2007–2020 / S. A. Dmitriev, E. S. Simonova // Reliability and quality of complex systems, 2023, No. 1, pp. 81–90.
7. Annual Safety Review 2024 / EASA, Cologne, 2024, 142 p.
8. Nikitenko, A. A. The impact of digitalization processes on the development of the global market for airworthiness services for civil aircraft // Russian Foreign Economic Bulletin, 2020, No. 5, pp. 53–59.
9. Andrianov, I. K. Development of an approach to detecting cracks in the blades of aircraft gas turbine engines under operating conditions // Bulletin of Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering, 2024, No. 1, pp. 4–20.
10. Smooth Sailing in the Sky: The Role of Predictive Maintenance in Aviation / Praxie: One Enterprise AI Platform. Available at: <https://praxie.com/predictive-maintenance-in-aviation/> (Accessed 05.04.2025).
11. Kulida, E. L. Problems in Applying Machine Learning Methods in Aviation / E. L. Kulida, V. G. Lebedev // Sixteenth International Conference "Management of Large-Scale Systems Development" (MLSD'2023), Moscow, September 26–28, 2023 / IPU RAS, Moscow, 2023, pp. 1315–1320.
12. Sokolovich, M. G. Information Technologies and Systems 2024 (ITS 2024) / M. G. Sokolovich, M. A. Aksenenko, V. A. Zakharyev // Proceedings of the international scientific conf., Minsk, November 20, 2024 / editorial board: L. Yu. Shilin [et al.]. Minsk, BSUIR, 2024, pp. 32–33.
13. Sagdiev, T. A. Analysis of aircraft engine failures / T. A. Sagdiev, I. S. Maturazov, N. A. Isakov // Bulletin of the Civil Aviation Academy, 2025, No. 1 (36), pp. 10–18.
14. Digital twin of a small-sized gas turbine engine centrifugal compressor test rig / Yu. M. Temis [et al.] // Aircraft engines, 2021, No. 1 (10), pp. 5–16.
15. Rostec shared its experience in implementing domestic digital solutions in the aviation industry / Rostec. Available at: <https://rostec.ru/media/pressrelease/rostekh-podelilsya-opytom-vnedreniya-otechestvennykh-tsifrovyykh-resheniy-v-aviatrasli/> (Accessed 05.04.2025).
16. Rostec has completed the development of a digital twin of the AI 222-25 aircraft engine / Rostec. Available at: <https://rostec.ru/upload/iblock/976/bilz7ea1i0i0qyj1cwjwqwf73d308qm5.pdf> (Accessed 05.04.2025).
17. UEC is introducing a new domestic standard for the development of digital twins of aircraft engines / United Engine Corporation JSC. Available at: <https://www.uecrus.com/press/odk-vnedryaet-novyy-otechestvennyy-standart-po-razrabotke-tsifrovyykh-dvoynikov-aviadvigately/> (Accessed 05.04.2025).
18. Santos, M. R. SHapley Additive exPlanations (SHAP) for Efficient Feature Selection in Rolling Bearing Fault Diagnosis / M. R. Santos, A. Guedes, I. Sanchez-Gendríz // Machine Learning and Knowledge Extraction, 2024, V. 6, No. 1, pp. 316–341.

*Статья поступила в редакцию
07.04.2025*