

УДК 629.735

DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-2-22-34

Пример оценки загрязнения проточной части ТРДД противообледенительной жидкостью с использованием статистических моделей

С.В. Некрасов¹, Б.А. Чичков¹

¹*Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия*

Аннотация: Загрязнение проточной части – одна из распространенных неисправностей в процессе эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей. При эксплуатации в зимний период существенную опасность представляет попадание противообледенительной жидкости и противогололедных агентов в проточную часть компрессора. Загрязнение рабочих лопаток компрессора (-ов) приводит к уменьшению проходных сечений межлопаточных каналов, изменению их формы и увеличению шероховатости поверхности пера лопаток. Все эти явления вызывают ухудшение характеристик компрессора: уменьшение КПД, снижение степени повышения давления и расхода воздуха, в результате чего происходит снижение тяги двигателя, рост температуры газов за турбиной, увеличение расхода топлива, снижение газодинамической устойчивости, изменение оборотов роторов. Для устранения загрязнения газозоудного тракта в эксплуатации выполняют периодические промывки проточной части, используя в качестве чистящего агента твердотельные очистители, жидкие моющие средства и воду. В статье анализируется изменение отклонений значений регистрируемых параметров турбореактивного двухконтурного двигателя от базовых значений как при загрязнении проточной части противообледенительной жидкостью, так и при устранении загрязнения с использованием статистических моделей, базирующихся на методах анализа временных рядов, динамики характеристик моделей, описывающих связи между параметрами, а также анализа синхронии изменения параметров двигателей одного воздушного судна. Статья не ставит целью сообщить среднестатистические значения изменения параметров для типа двигателя и конкретной неисправности, но показать в основном принцип и работоспособность метода диагностирования, использующего принцип оценки динамики значимости и устойчивости корреляционных связей между регистрируемыми параметрами, что в настоящее время недостаточно используется в научно-методических основах построения и применения в эксплуатации статистических диагностических моделей.

Ключевые слова: авиационный газотурбинный двигатель (ГТД), турбореактивный двухконтурный двигатель (ТРДД), загрязнение проточной части ТРДД, промывка проточной части, контролируемые параметры, отклонение значения регистрируемого параметра от базового значения, аппроксимация, модель статистическая, зависимость регрессионная.

Для цитирования: Некрасов С.В., Чичков Б.А. Пример оценки загрязнения проточной части ТРДД противообледенительной жидкостью с использованием статистических моделей // Научный вестник МГТУ ГА. 2025. Т. 28, № 2. С. 22–34. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-2-22-34

The example of BTJE flow path contamination assessment with anti-icing fluid using statistical models

S.V. Nekrasov¹, B.A. Chichkov¹

¹*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

Abstract: Contamination of the compressor flow path is one of the most prevalent issues encountered during the operation of aircraft gas turbine engines (GTEs). During operation in winter, ingestion of anti-icing fluids and de-icing agents into the compressor flow path presents a substantial risk. In particular, contamination of the compressor rotor blades leads to the reduction in the cross-sectional areas of the inter-blade channels, changes in their shape, and an increase in the roughness of the

blade surfaces. All these phenomena compromise compressor performance: result in reduced efficiency, decreased pressure ratio, and airflow, resulting in lower engine thrust, increased jet pipe temperature, higher fuel consumption, reduced gas-dynamic stability, and altered rotor speeds. To eliminate contamination in the gas-air duct during operation, periodic washings of the flow part are performed using solid cleaners, liquid detergents, and water as cleaning agents. The article analyzes changes in deviations of bypass turbo-jet engine recorded parameters from baseline values both when contaminated with anti-icing fluids and after removing contaminants using statistical models based on time series analysis methods, dynamics of model characteristics describing relationships between parameters, as well as synchronization analysis of parameter changes in engines of the same aircraft. The article does not aim to report average parameter change values for a specific engine type and fault but rather demonstrates the principle and effectiveness of the diagnostic method that uses the principle of assessing the dynamics of significance and stability of correlation links between recorded parameters, which are currently underutilized in the scientific-methodological foundations of constructing and applying statistical diagnostic models in operational practice.

Key words: aviation gas-turbine engine (GTE), bypass turbo-jet engine (BTJE), contamination of BTJE flow path, washing of flow path, controlled parameters, deviations of bypass turbo-jet engine (BTJE) recorded parameters from baseline values, approximation, statistical model, regression dependence.

For citation: Nekrasov, S.V., Chichkov, B.A. (2025). The example of BTJE flow path contamination assessment with anti-icing fluid using statistical models. Civil Aviation High Technologies, vol. 28, no. 2, pp. 22–34. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-2-22-34

Введение

Загрязнение проточной части авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) вызывается попаданием в проточную часть песка, пыли, мелких камней, масла и других отложений; пылцы, летучих семян растений, насекомых в летний период; морской соли при полетах над океаном; вулканического пепла при полетах в зонах вулканической активности, а также противообледенительной жидкости и является естественной и одной из распространенных неисправностей в процессе эксплуатации. В зимний период эксплуатации попадание противообледенительной жидкости и противогололедных агентов в проточную часть компрессора приводит в основном к образованию отложений на корытце лопаток направляющих аппаратов первых ступеней. Загрязнение рабочих лопаток компрессоров вызывает уменьшение проходных сечений межлопаточных каналов, изменение их формы и увеличение шероховатости поверхности лопаток, следствием чего является ухудшение характеристик компрессора: уменьшение КПД, снижение степени повышения давления и расхода воздуха, снижение тяги двигателя, рост температуры газов за турбиной, увеличение расхода топлива, снижение газодинамической

устойчивости компрессора, изменение оборотов роторов. Для устранения загрязнения газозавоздушного тракта в эксплуатации выполняют периодические промывки проточной части с использованием в качестве чистящего агента твердотельных очистителей, жидких моющих средств и воды. В качестве противообледенительной жидкости применяют жидкости четырех типов. В зависимости от степени обледенения и атмосферных условий может применяться одноступенчатая и двухступенчатая противообледенительная защита самолета. Обработка может проводиться с запущенными и выключенными двигателями самолета¹.

Для проведения противообледенительной обработки воздушных судов (ВС) используют специальный автомобиль (рис. 1). Очистку твердотельными очистителями производят на работающем двигателе, в качестве твердотельного очистителя используют органический очиститель или карбопласт [1]. Очистку жидкими моющими средствами производят на режиме холодной прокрутки. Промывающую жидкость выбирают исходя из типа за-

¹ Руководство Р-2.2-01-18 (Версия 8). Противообледенительная защита воздушных судов силами общества с ограниченной ответственностью «Шереметьево Хэндлинг». М.: Шерем. Хэндлинг, 2021. 227 с.



Рис. 1. Машина Vestergaard Elephant Beta для противообледенительной обработки ВС

Fig. 1. The Vestergaard Elephant Beta machine for the aircraft de-icing

грязнения и температуры наружного воздуха. Например, для самолета типа A320 с двигателями типа CFM56-5B в соответствии с АММ² предусмотрено две процедуры промывки двигателей в соответствии с документами 72-00-00-100-028 «Очистка газозвдушного тракта с использованием чистящих средств»; 72-00-00-100-026 «Очистка газозвдушного тракта водой».

Очистка газозвдушного тракта с использованием специализированных чистящих жидкостей производится, когда газозвдушный тракт засорен органическими загрязнениями, масляными отложениями или параметр «Запас температуры газов» (EGTMargin) уменьшается более чем на 5 °С. Отличительной особенностью промывки газозвдушного тракта с использованием специализированных чистящих жидкостей в отличие от промывки водой являются следующие действия: после промывки чистящим средством один и более раз необходимо смыть остатки средства водой, для этого 3 раза выполняется процедура промывки двигателя, описанная выше. На рис. 2 показано оборудование, применяемое для выполнения процедуры промывки проточной части турбореактивного двухконтурного двигателя (ТРДД).

Для уменьшения случаев загрязнения проточной части ГТД противообледенительной



Рис. 2. Оборудование для промывки проточной части двигателя

Fig. 2. Equipment for washing the engine flow path

жидкостью (далее – загрязнения проточной части) рекомендуется: производить обработку противообледенительной жидкостью самолета с выключенными двигателями; не допускать прямого попадания струи противообледенительной жидкости в воздухозаборник двигателя; не обрабатывать элементы конструкции планера, находящиеся в непосредственной близости к не закрытым заглушкам воздухозаборникам двигателя; случайно попавшую жидкость необходимо удалять до запуска двигателей; при необходимости устанавливать заглушки на воздухозаборник двигателя; удалять снежно-ледяные отложения на воздухозаборнике и лопатках вентилятора при помощи воздушного потока или мягкой щетки; удалять противообледенительную жидкость с перрона до начала руления самолета; не запускать двигатель в месте выполнения противообледенительной обработки.

² Руководство по технической эксплуатации семейства воздушного судна A320, 2022. 21 с.

Статья не ставит целью сообщить среднестатистические значения изменения параметров для типа двигателя и конкретной неисправности, но показать в основном принцип и работоспособность метода диагностирования, использующего принцип оценки динамики значимости и устойчивости корреляционных связей между регистрируемыми параметрами, что в настоящее время недостаточно используется в научно-методических основах построения и применения в эксплуатации статистических диагностических моделей.

Описание принципов оценки загрязнения проточной части по данным регистрируемых параметров с использованием статистических моделей

В процессе эксплуатации авиационных двигателей контролируется, регистрируется и обрабатывается для дальнейшего анализа ряд параметров³ [2–11], из которых в рамках настоящей статьи использованы и обозначены отклонение оборотов ротора высокого давления (ВД) от базового значения (базовой линии при графическом представлении) (GPCN25); отклонение температуры газов за турбиной от базового значения (DEGT); отклонение расхода топлива от базового значения относительное (GWFM); запас по температуре газов за турбиной на взлетном режиме работы (EGTHDM).

Перечень статистических (изложение их математического аппарата в работах [12–16]) диагностических моделей и общие принципы оценки загрязнения проточной части ТРДД с их использованием далее представлены на примере оценок для двух двигателей одного самолета.

На рис. 3–6 представлены результаты обработки основных параметров двигателей 1-го и 2-го типа CFM56-5b самолета типа Airbus A320, сглаженных скользящим средним по дан-

ным 10 полетов. Такого рода модели наглядны, работоспособны и массово используются в эксплуатации двигателей различных типов [3, 5–11] для оценки их технического состояния.

В рассматриваемом здесь примере имеет место снижение запаса по температуре газов за турбиной при работе на взлетном режиме работы (рис. 3). Для двигателя 1 оно составило около 9 °С; для двигателя 2 – около 14 °С. Снижение запаса происходит вследствие роста расхода топлива, снижения КПД компрессора и расхода воздуха [4]. Наблюдается синхрония изменения параметра двигателей. Большее изменение анализируемого параметра на двигателе 2 может быть обусловлено попаданием в него большего количества противобледенительной жидкости и (или) большей наработкой, сопровождаемой большим естественным эрозионным износом лопаток. Параметр EGTHDM может рассматриваться как основной параметр, характеризующий степень изменения геометрии проточной части газоздушного тракта двигателя при его загрязнении.

Проведенная эндоскопия газоздушного тракта подтвердила наличие дефекта, а именно засорение проточной части противобледенительной жидкостью. В момент обнаружения неисправности у двигателя 1 наработка после последнего ремонта 15824 ч и 5651 цикл; у двигателя 2 наработка после последнего ремонта 17374 ч и 5985 цикл.

На рис. 4 наблюдается рост расхода топлива на крейсерском режиме работы двигателя. Это может являться следствием изменения характера обтекания лопаток компрессора, которое привело к снижению КПД компрессора и уменьшению степени повышения давления в компрессоре. Поскольку в двигателе типа CFM56-5b реализована программа управления $N1 = \text{const}$, то для поддержания постоянных оборотов ротора низкого давления (НД) при сниженном КПД компрессора автоматика увеличивает подачу топлива в камеру сгорания. При сравнении изменения расхода топлива двигателей 1 и 2, представленного на рис. 4, так же, как и на рис. 3, наблюдается синхрония изменения параметров обоих двигателей.

³ Use of engine condition monitoring (ECM) Update [Электронный ресурс] // EASA. 2018. 3 p. URL: <https://www.easa.europa.eu/download/imrbpb/IP%20177%20-%20Use%20of%20Engine%20Condition%20Monitoring.pdf> (дата обращения: 20.08.2024).

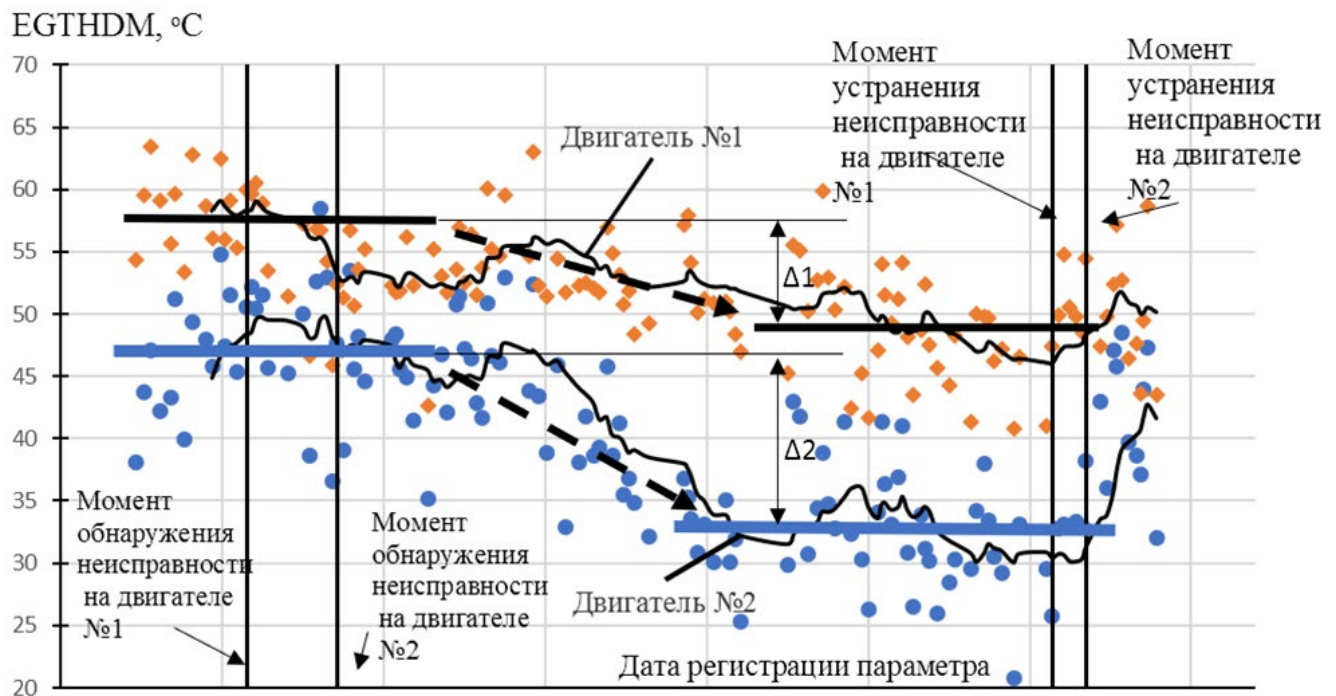


Рис. 3. Сравнение сглаженных по 10 полетам значений параметра «Запас по температуре газов за турбиной» на взлетном режиме двигателя 1 и 2 одного ВС

Fig. 3. Comparison of 10 flights smoothed values of the parameter “Jet Pipe Temperature Margin” in take-off mode for Engine No. 1 and Engine No. 2 of the same aircraft

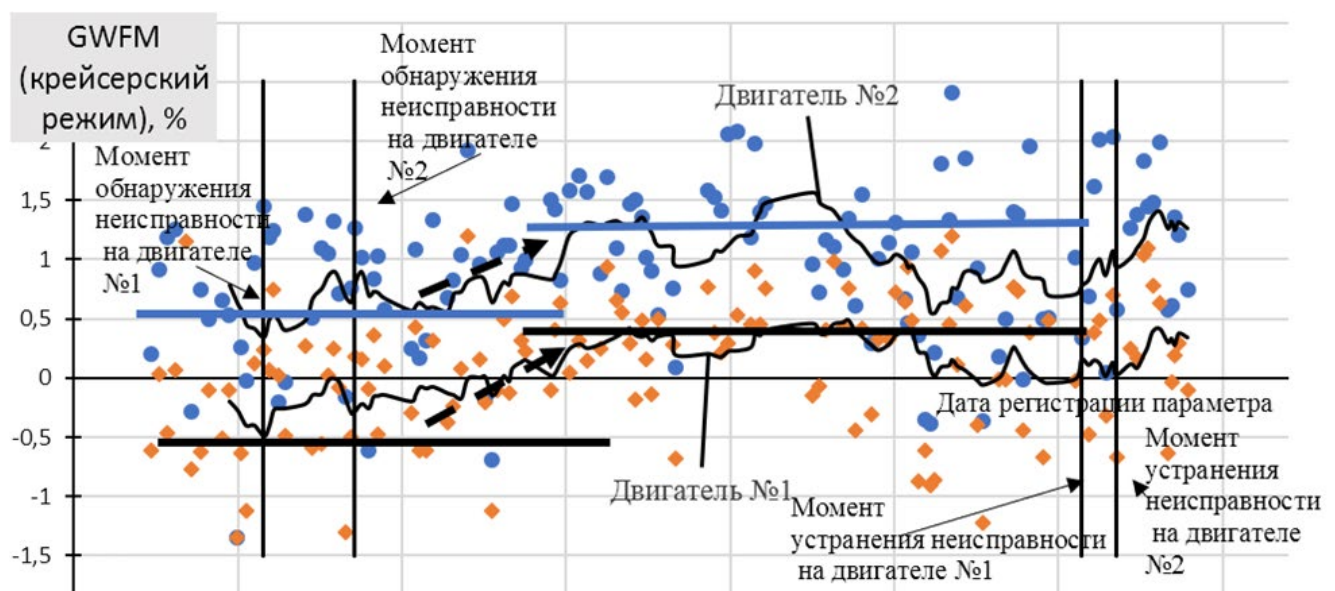


Рис. 4. Сравнение сглаженных по 10 полетам значений параметра «Отклонение значений расхода топлива от базовой линии» на крейсерском режиме полета двигателя 1 и 2 одного ВС

Fig. 4. Comparison of 10 flights smoothed values of the parameter “Deviation of Fuel Consumption Values from the Baseline” in cruise flight mode for Engine No. 1 and Engine No. 2 of the same aircraft

Также анализ изменения параметра «Отклонение температуры газов за турбиной от базовой линии», зарегистрированный на крейсерском режиме работы, результаты обработки которого представлены на рис. 5, показывает увеличение отклонения температуры газов за турбиной от базовой линии. Для двигателя 1 увеличение параметра составило около 10 °С, для двигателя 2 – около 8 °С.

На рис. 6 показаны результаты обработки данных параметра «Отклонение значений оборотов ротора высокого давления от базовой линии». Наблюдается незначительное уменьшение оборотов во время крейсерского режима работы двигателя: для двигателя 1 уменьшение составило 0,3 %; для двигателя 2 – 0,15 %. Изменение оборотов ротора высокого давления обусловлено изменением газодинамической связи между ротором НД и ротором ВД, ухудшением аэродинамики потока, приводящим к возрастанию нагрузки на турбину высокого давления.

В рамках совершенствования средств системы параметрического диагностирования двигателя типа CFM56-5b могут быть предложены следующие диагностические критерии для выявления рассматриваемой неисправности двигателя: значимое (более 70 %) изменение средних уровней основных параметров двигателя (GPCN25 (отклонение оборотов ротора ВД от базовой линии); DEGT (отклонение температуры газов за турбиной от базовой линии); GWFM (отклонение расхода топлива от базовой линии); EGTNDM (запас по температуре газов за турбиной на взлетном режиме работы)); снижение запаса по температуре газов за турбиной на взлетном режиме работы двигателя на 10–15 °С; увеличение расхода топлива на крейсерском режиме работы двигателя на 0,6–0,8 %; увеличение отклонения температуры газов за турбиной от базовой линии на крейсерском режиме работы двигателя на 8–10 °С; уменьшение оборотов ротора низкого давления на 0,15–0,3 %.

В рамках совершенствования методологического обеспечения параметрического диагностирования двигателя типа CFM56-5b обоснуем и выполнение анализа связей меж-

ду основными параметрами двигателя [2]: изменение технического состояния двигателя сопровождается изменением тесноты связей между параметрами и изменением конфигурации регрессионных моделей вида «Параметр_J=F(Параметр_I)» (I, J – параметры из перечня регистрируемых на двигателе), не представленного в работах схожей тематики [5–11].

Для оценки значимости связей между параметрами используется коэффициент парной корреляции R . Расчетный коэффициент признается значимым в случае, если его значение не меньше значения из таблицы значимых коэффициентов корреляции Фишера. Для выборки из 10 значений и уровне значимости $\alpha = 0,05$ значимым коэффициентом корреляции является $R_{кр} = 0,63$ [12].

Как следует из результатов, представленных на рис. 7, 8, до обнаружения загрязнения проточной части двигателя между параметрами GPCN25 (отклонение оборотов ротора ВД от базовой линии) и GWFM (отклонение расхода топлива от базовой линии) обоих двигателей присутствует стабильная корреляционная связь, которая подтверждает технически исправное состояние проточной части двигателя. Появление корреляционной связи в день до промывки проточной части двигателя 2 может быть обусловлено выгоранием продуктов засорения проточной части. После обнаружения загрязнения проточной части наблюдается потеря корреляционной связи между параметрами до момента выполнения работ по промывке проточной части (устранения неисправности). После устранения неисправности вновь наблюдается устойчивая корреляционная связь между рассматриваемыми параметрами. Перечисленные признаки являются критериями изменения технического состояния двигателя для рассматриваемой неисправности.

На рис. 9 показано изменение линейных регрессионных моделей (математический аппарат [12–16]), описывающих зависимости параметров $GWFM = F(GPCN25)$ двигателя 2. Как следует из представленной зависимости, до обнаружения загрязнения проточной части

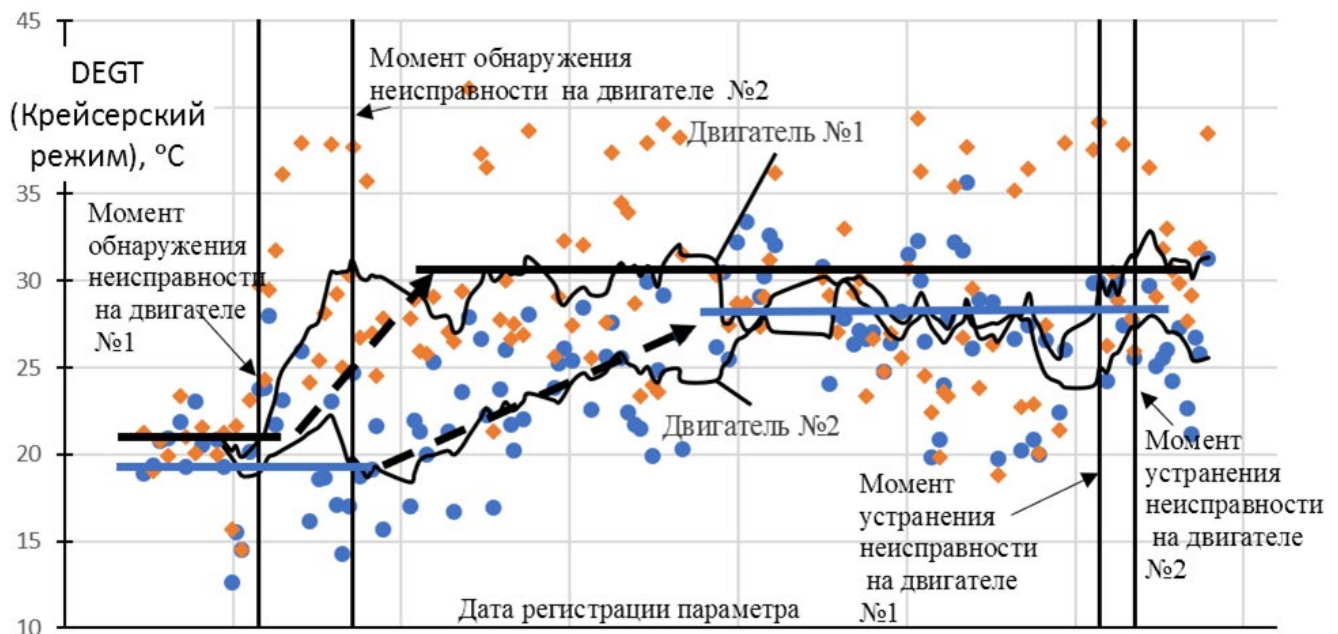


Рис. 5. Сравнение сглаженных по 10 полетам значений параметра «Отклонение значений температуры газов за турбиной от базовой линии» на крейсерском режиме двигателя 1 и 2 одного ВС

Fig. 5. Comparison of 10 flights smoothed values of the parameter “Deviation of Jet Pipe Temperature from the Baseline” in cruise mode for Engine No. 1 and Engine No. 2 of the same aircraft

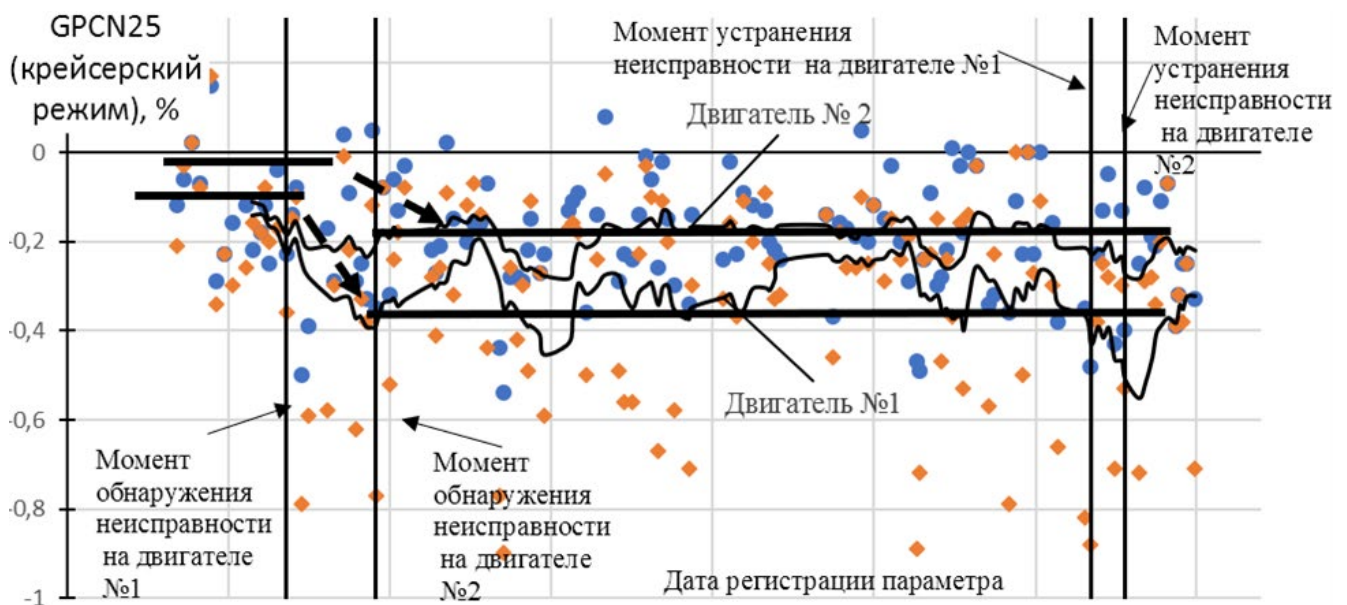


Рис. 6. Сравнение сглаженных по 10 полетам значений параметра «Отклонение значений оборотов ротора высокого давления от базовой линии» на крейсерском режиме двигателя 1 и 2 одного ВС

Fig. 6. Comparison of 10 flights smoothed values of the parameter “Deviation of High-Pressure Rotor Speed Values from Baseline” in cruise mode for Engine No. 1 and Engine No. 2 of the same aircraft



Рис. 7. Динамика изменения коэффициента парной корреляции параметров GPCN25 (отклонение оборотов ротора ВД от базовой линии) и GWFM (отклонение расхода топлива от базовой линии) двигателя 2

Fig. 7. Dynamics of change in the pair correlation coefficient of the GPCN25 parameters (deviation of a HP rotor speed from the baseline) and GWFM (a fuel consumption deviation from the baseline) for Engine No. 2

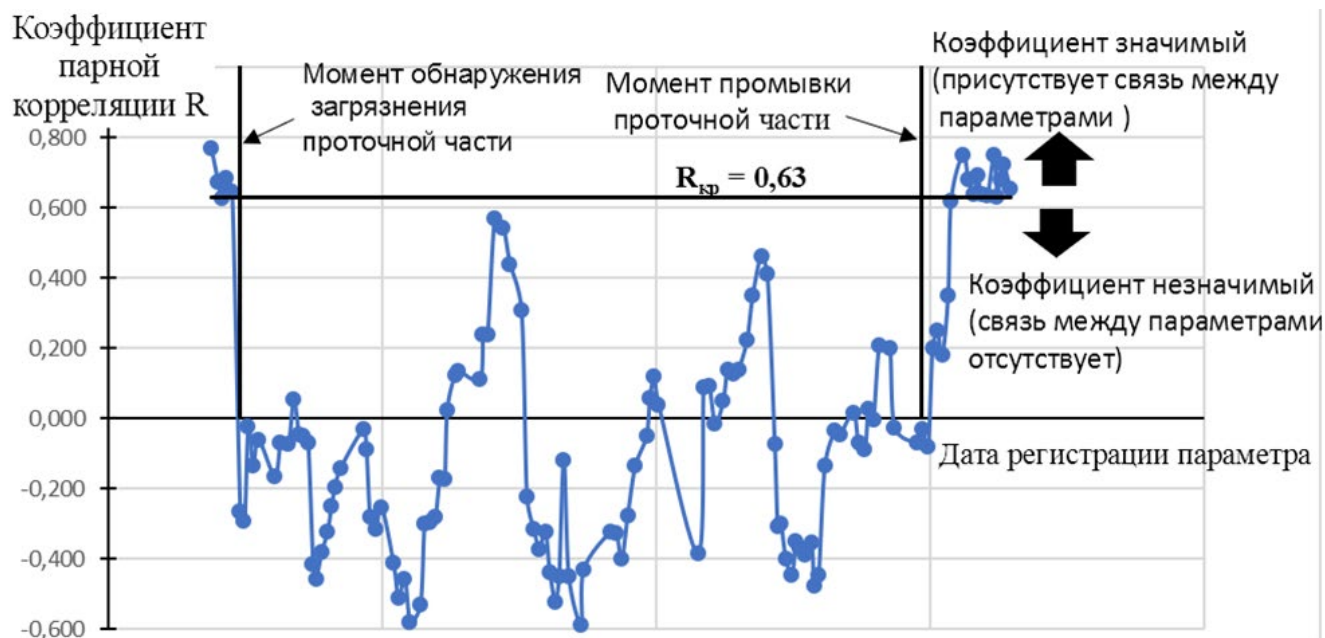


Рис. 8. Динамика изменения коэффициента парной корреляции параметров GPCN25 (отклонение оборотов ротора ВД от базовой линии) и GWFM (отклонение расхода топлива от базовой линии) двигателя 1

Fig. 8. Dynamics of change in the pair correlation coefficient of the GPCN25 parameters (deviation of a HP rotor speed from the baseline) and GWFM (a fuel consumption deviation from the baseline) for Engine No. 1

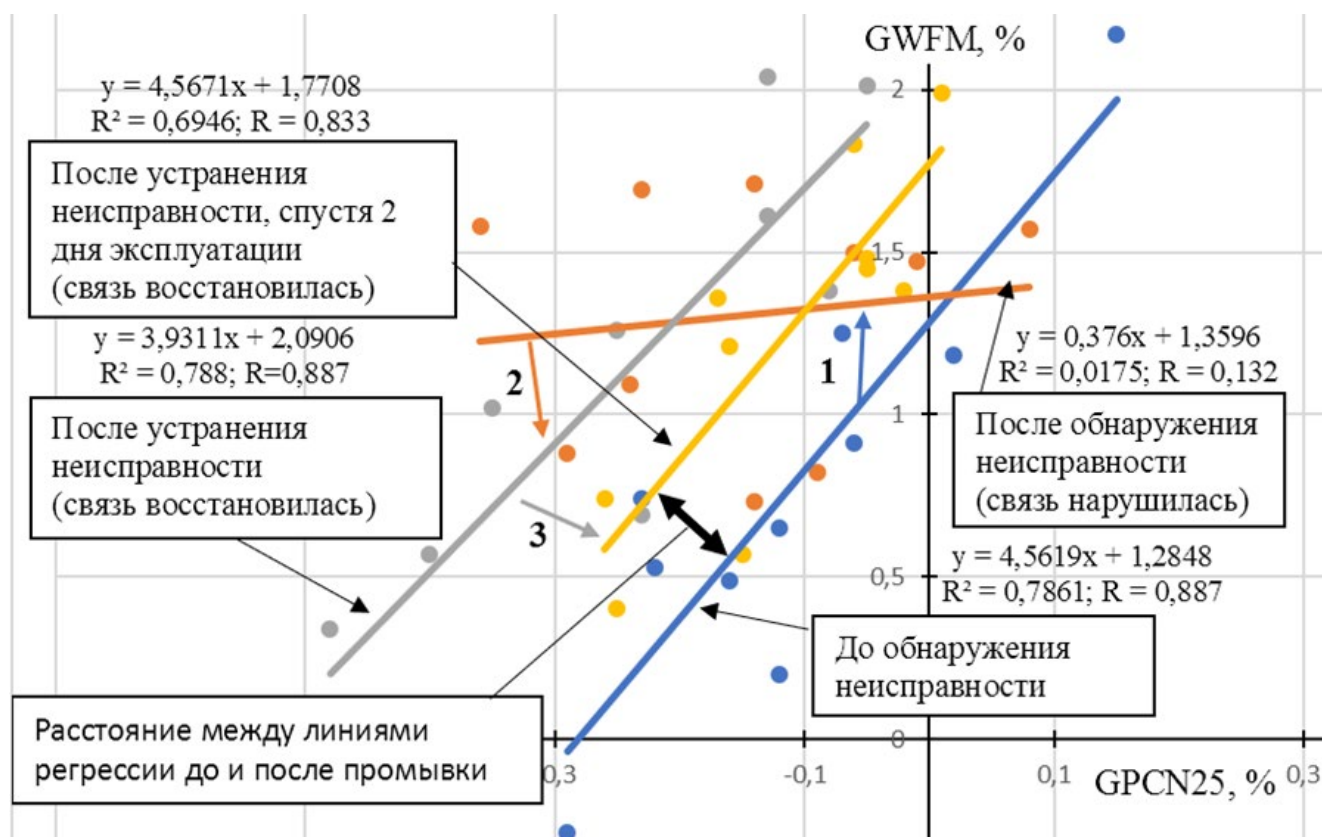


Рис. 9. Изменение регрессионных моделей, описывающих зависимость параметра GWFM (отклонение расхода топлива от базовой линии) от GPCN25 (отклонение оборотов ротора ВД от базовой линии), при разных состояниях проточной части двигателя 2

Fig. 9. Change of regression models describing the dependence of the GWFM parameter (a fuel consumption deviation from the baseline) on GPCN25 (deviation of HP rotor from the baseline) under different states of flow path of the Engine No. 2

наблюдается стабильная связь (о чем свидетельствует значимость коэффициента корреляции $R > R_{кр}$) $R = 0,887$ (синяя линия), после обнаружения загрязнения происходит потеря связи между параметрами ($R = 0,132$ (оранжевая линия)). После выполнения процедуры промывки (устранения неисправности) наблюдается восстановление связи между параметрами ($R = 0,887$ (серая линия)) и смещение линии регрессии влево относительно первоначальной линии до промывки. Данная особенность может быть связана с остатками моющей жидкости в проточной части или некачественно выполненной процедурой. Спустя 2 дня эксплуатации наблюдается тенденция к возвращению линии регрессии к первоначальному положению до промывки (желтая линия).

На рис. 10 показано изменение регрессионных моделей, описывающих зависимости параметров $GWFM = F(GPCN25)$ двигателя 1. Аналогично регрессионным моделям, представленным на рис. 9, до обнаружения загрязнения проточной части наблюдается стабильная связь между параметрами (о чем свидетельствует значимость коэффициента корреляции $R > R_{кр}$) ($R = 0,6744$ (синяя линия)), после обнаружения загрязнения происходит потеря связи между параметрами ($R = 0,132$ (оранжевая линия)). После выполнения процедуры промывки (устранения неисправности) наблюдается восстановление связи между параметрами $R = 0,636$ (серая линия) и смещение линии регрессии влево относительно первоначальной линии до промывки. Данная особенность может быть свя-

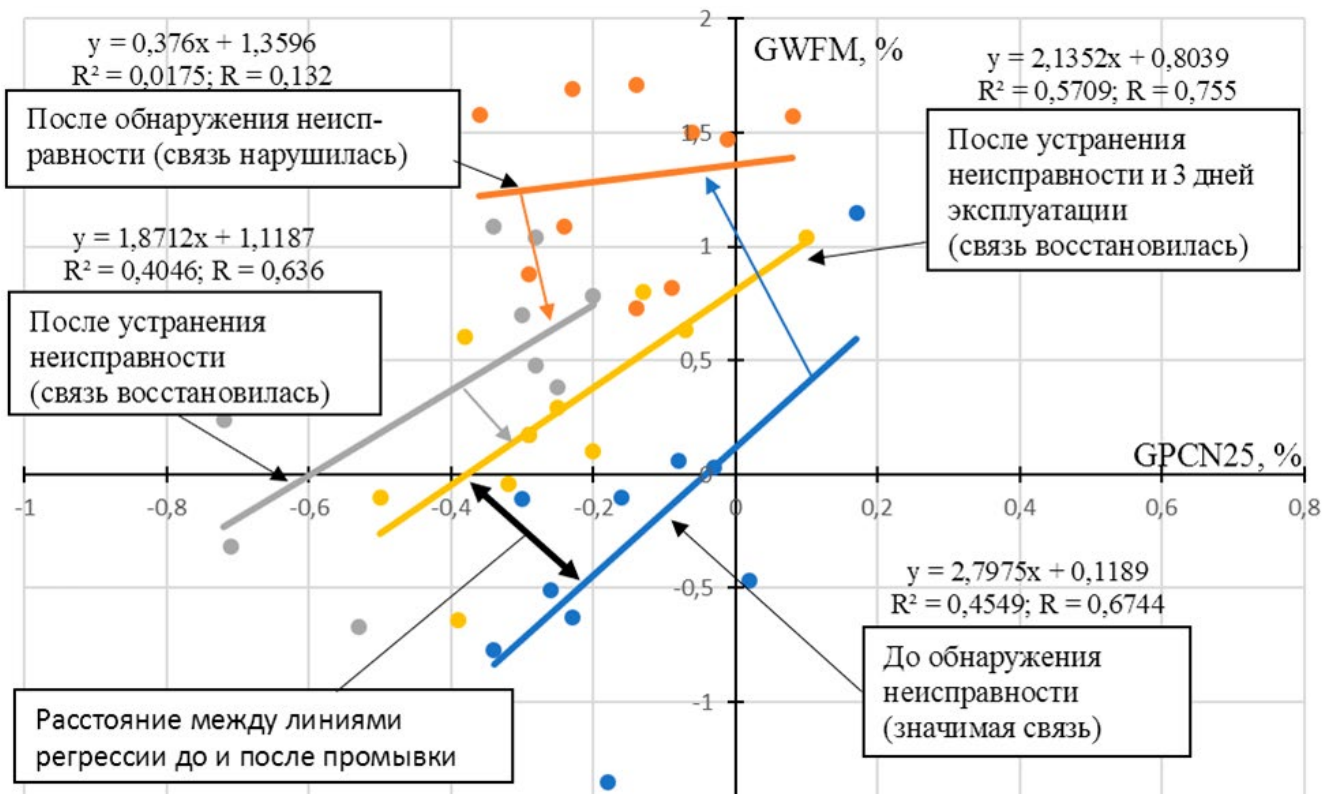


Рис. 10. Изменение регрессионных моделей, описывающих зависимость параметра GWFM (отклонение расхода топлива от базовой линии) от GPCN25 (отклонение оборотов ротора ВД от базовой линии), при разных состояниях проточной части двигателя 1

Fig. 10. Change of regression models describing the dependence of the GWFM parameter (a fuel consumption deviation from the baseline) on GPCN25 (deviation of HP rotor from the baseline) under different states of flow path of the Engine No. 1

зана с влиянием остатков моющей жидкости в проточной части или некачественно выполненной процедурой промывки. Спустя 3 дня эксплуатации наблюдается тенденция возвращения линии регрессии к первоначальному положению до промывки (желтая линия).

В целом из анализа представленных зависимостей следует, что изменение технического состояния проточной части двигателя сопровождается изменением тесноты связей между рассматриваемыми параметрами и изменением положения линии регрессии, используемой в соответствующей модели. О качестве выполненной процедуры промывки проточной части двигателя можно судить по степени возвращения линии регрессии (характеристик регрессионных моделей) к первоначальному положению (исходным характеристикам моделей).

Заключение

Оценка загрязнения проточной части ТРДД с использованием рассмотренных в статье статистических моделей позволяет установить и подтвердить неисправность «загрязнение проточной части двигателя противообледенительной жидкостью и противогололедными агентами».

Предложен критерий оценки загрязнения проточной части на основании анализа динамики характеристик корреляционных связей между регистрируемыми в процессе эксплуатации и производными от них параметрами. Еще одним критерием изменения технического состояния ТРДД является изменение положения линий регрессионных моделей, описывающих зависимости между регистрируемыми

в эксплуатации параметрами, по отношению к базовой линии регрессии (для заведомо исправного двигателя).

Для случая загрязнения проточной части двигателя типа CFM56-5b противообледенительной жидкостью сформулированы следующие диагностические критерии: потеря корреляционной связи между параметрами GPCN25 (отклонение оборотов ротора ВД от базовой линии) и GWFM (отклонение расхода топлива от базовой линии); смещение линий регрессионных моделей, описывающих зависимость GWFM (отклонение расхода топлива от базовой линии) от DEGT (отклонение значений температуры газов за турбиной от базовой линии), вправо относительно линии, характеризующей исправное состояние двигателя (фактические значения см. в тексте статьи).

Критерием качества выполненной процедуры очистки двигателя от продуктов противообледенительной обработки, может являться степень возвращения линии регрессионной модели к первоначальному положению.

Список литературы

1. **Ночовная Н.А., Никитин Я.Ю.** Современное состояние вопроса в области очистки проточной части компрессора ГТД от эксплуатационных загрязнений [Электронный ресурс] // Труды ВИАМ. 2017. № 3 (51). С. 45–54. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-3-5-5 (дата обращения: 20.08.2024).
2. **Чичков Б.А.** Параметрическая диагностика АД: учеб. пособие. М.: ИД Академии Жуковского, 2018. 84 с.
3. **Verbist M.** Gas path analysis for enhanced aero-engine condition monitoring and maintenance: Doctoral Thesis. Delft University of Technology, 2017. 176 p. DOI: 10.4233/uuid:e1079009-84c2-482d-afe4-e1f9fde0d137
4. **Литвинов Ю.А., Боровик В.О.** Характеристики и эксплуатационные свойства авиационных турбореактивных двигателей. М.: Транспорт, 1979. 288 с.
5. **Ribeiro S.** Implementation of an engine condition monitoring tool for airbus aircraft [Электронный ресурс] // semanticscholar.org. 2015. 10 p. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Implementation-of-an-Engine-Condition-Monitoring-Ribeiro/065452dec758be3cd6c63d9f49a5513f89ee21a0> (дата обращения: 20.08.2024).
6. **Stamatis A.G.** Engine condition monitoring and diagnostics. In book: Progress in Gas Turbine Performance. Greece: University of Thessaly, 2013. Pp. 187–212. DOI: 10.5772/54409
7. **Binner M., Friedrichs J.** MTU – Engine Condition Monitoring (ECM) [Электронный ресурс] // MTU Maintenance, 2009. 22 p. URL: https://files.messe.de/abstracts/34119_MDA_Vortrag_Friedrichs_MTU_230409.pdf (дата обращения: 20.08.2024).
8. **Смирнов Н.Н.** Техническая эксплуатация летательных аппаратов: учебник для вузов. М.: Транспорт, 1990. 423 с.
9. **Šplíchal M., Červenka M., Juracka J.** Engine condition monitoring on small single engine turboprop // Aircraft Engineering and Aerospace Technology. 2023. Vol. 9, no. 9. Pp. 1335–1343. DOI: 10.1108/AEAT-09-2022-0249
10. **Clifton D.** Condition monitoring of Gas-Turbine engines. University of Oxford, 2006. 60 p.
11. **Herzog J.** High performance condition monitoring of aircraft engines / J. Herzog, J. Hanlin, S.W. Wegerich, A.D. Wilks [Электронный ресурс] // Proceedings of GT2005 ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea and Air, 2005. 10 p. DOI: 10.1115/GT2005-68485 (дата обращения: 20.08.2024).
12. **Химмельблау Д.** Анализ процессов статистическими методами / Пер. с англ. В.Д. Скаржинского, под ред. В.Г. Горского. М.: Мир, 1973. 957 с.
13. **Harrell F.E.** Regression modeling strategies with applications to linear models, logistic and ordinal regression, and survival analysis. 2nd ed. Springer Cham, 2015. 582 p. DOI: 10.1007/978-3-319-19425-7
14. **Дрейпер Н., Смит Г.** Прикладной регрессионный анализ. В 2 кн. Кн. 1. М.: Финансы и статистика, 1986. 366 с.

15. Box G.E.P., Hunter J.S., Hunter W.G. Statistics for experimenters: design, discovery, and innovation. 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc., 2005. 672 p.

16. Box G.E.P. Time series analysis: forecasting and control / G.E.P. Box, G.M. Jenkins, G.C. Reinsel, G.M. Ljung. 4th ed. John Wiley & Sons, Inc., 2008. 765 p.

References

1. Nochovnaya, N.A., Nikitin, Ya.Yu. (2017). The current state of the question in the field of cleaning of the compressor gte from operational pollution (review). *Proceedings of VIAM*, no. 3 (51), pp. 45–54. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-3-5-5 (accessed: 20.08.2024). (in Russian)

2. Chichkov, B.A. (2018). Parametric diagnostics of aircraft engine: Tutorial. Moscow: Izdatelskiy Dom Akademii Zhukovskogo, 84 p. (in Russian)

3. Verbist, M. (2017). Gas path analysis for enhanced aero-engine condition monitoring and maintenance: Doctoral Thesis. Delft University of Technology, 176 p. DOI: 10.4233/uuid:e1079009-84c2-482d-afe4-e1f9fde0d137

4. Litvinov, Yu.A., Borovik, V.O. (1979). Characteristics and operational properties of aircraft turbojet engines. Moscow: Mashinostroyeniye, 288 p. (in Russian)

5. Ribeiro, S. (2015). Implementation of an engine condition monitoring tool for airbus aircraft. *Semanticscholar.org*, 10 p. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Implementation-of-an-Engine-Condition-Monitoring-Ribeiro/065452dec758be3cd6c63d9f49a-5513f89ee21a0> (accessed: 20.08.2024).

6. Stamatis, A.G. (2013). Engine condition monitoring and diagnostics. In book: Progress in Gas Turbine Performance. Greece: University of Thessaly, pp. 187–212. DOI: 10.5772/54409

7. Binner, M., Friedrichs, J. (2009). MTU – Engine Condition Monitoring (ECM). *MTU Maintenance*, 22 p. Available at: https://files.messe.de/abstracts/34119_MDA_Vortrag_Friedrichs_MTU_230409.pdf (accessed: 20.08.2024).

8. Smirnov, N.N. (1990). Technical operation of aircraft: a textbook for universities. Moscow: Transport, 423 p. (in Russian)

9. Šplíchal, M., Červenka, M., Juracka, J. (2023). Engine condition monitoring on small single engine turboprop. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, vol. 95, no. 9, pp. 1335–1343. DOI: 10.1108/AEAT-09-2022-0249

10. Clifton, D. (2006). Condition monitoring of Gas-Turbine engines. University of Oxford, 60 p.

11. Herzog, J., Hanlin, J., Wegerich, S.W., Wilks, A.D. (2005). High performance condition monitoring of aircraft engines. In: *Proceedings of GT2005 ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea and Air*, 10 p. DOI: 10.1115/GT2005-68485 (accessed: 20.08.2024).

12. Himmelblay, D.M. (1970). Process analysis by statistical methods. Publisher: John Wiley & Sons Inc, 463 p.

13. Harrell, F.E. (2015). Regression modeling strategies with applications to linear models, logistic and ordinal regression, and survival analysis. 2nd ed. Springer Cham, 582 p. DOI: 10.1007/978-3-319-19425-7

14. Drejper, N., Smit, G. (1986). Applied regression analysis: In 2 books. Book 1. Moscow: Finansy i statistika, 366 p. (in Russian)

15. Box, G.E.P., Hunter, J.S., Hunter, W.G. (2005). Statistics for experimenters: design, discovery, and innovation. 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc., 672 p.

16. Box, G.E.P., Jenkins, G.M., Reinsel, G.C., Ljung, G.M. (2008). Time series analysis: forecasting and control. 4th ed. John Wiley & Sons, Inc., 765 p.

Сведения об авторах

Некрасов Сергей Владимирович, выпускник МГТУ ГА, sergey.nekrasov.999@mail.ru.

Чичков Борис Анатольевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры двигателей летательных аппаратов МГТУ ГА, b.chichkov@mstuca.ru.

Information about the authors

Sergey V. Nekrasov, Graduate of Moscow State Technical University of Civil Aviation, sergey.nekrasov.999@mail.ru.

Boris A. Chichkov, Doctor of Technical Science, Professor, Professor of the Chair of Aircraft Engine Engineering, Moscow State Technical University of Civil Aviation, b.chichkov@mstuca.ru.

Поступила в редакцию	25.11.2024	Received	25.11.2024
Одобрена после рецензирования	29.01.2025	Approved after reviewing	29.01.2025
Принята в печать	25.03.2025	Accepted for publication	25.03.2025