

РЕСУРС ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОРРОЗИОННЫХ СРЕД

© 2019

М. В. Пивоварова инженер-конструктор-расчётчик 1 категории;
АО «ОДК-Авиадвигатель», г. Пермь;
maria-assoll@yandex.ru

И. Л. Гладкий кандидат технических наук, начальник отдела;
АО «ОДК-Авиадвигатель», г. Пермь;
office@avid.ru

В настоящее время эксплуатация газотурбинных двигателей происходит в агрессивной среде атмосферы некоторых климатических регионов. Как следствие, в процессе эксплуатации может произойти ускоренное снижение прочностных свойств деталей газотурбинной техники и последующее их преждевременное разрушение под действием силовых нагрузок и температуры. Актуальной является задача определения ресурса деталей газотурбинных двигателей в условиях воздействия коррозионной среды. В АО «ОДК-Авиадвигатель» выполнен анализ российских и зарубежных перспективных разработок по определению ресурса деталей газотурбинных двигателей в условиях воздействия коррозионной среды. В АО «ОДК-Авиадвигатель», ФГУП «ВИАМ» и НПО «ЦКТИ» сформулированы подходы по разработке методологии назначения ресурса деталей в условиях воздействия коррозионной среды при эксплуатации двигателя.

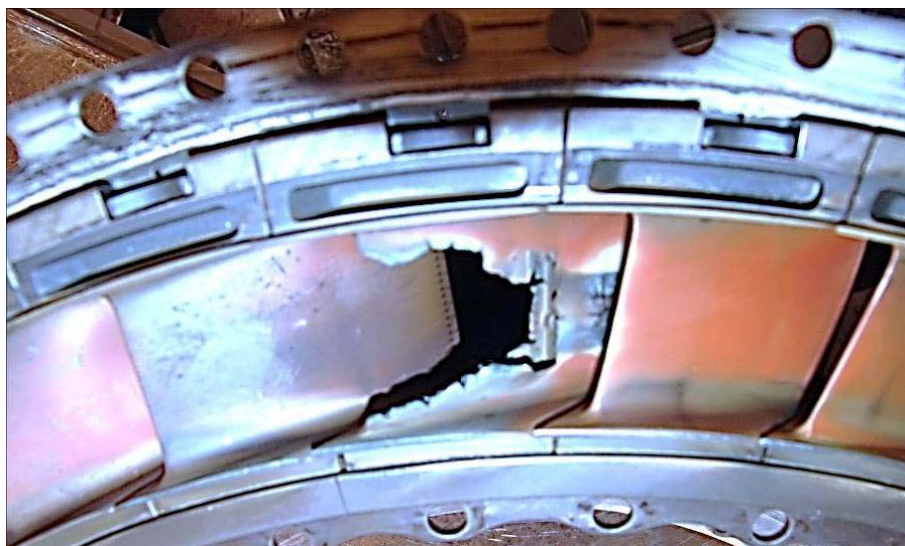
Газотурбинный двигатель; детали; ресурс; коррозионная среда; повреждения; механические характеристики; математическое моделирование.

Цитирование: Пивоварова М.В., Гладкий И.Л. Ресурс деталей газотурбинных двигателей в условиях воздействия коррозионных сред // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18, № 3. С. 109-117. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-3-109-117

Введение

В настоящее время газотурбинные двигатели (ГТД) эксплуатируются повсеместно, в разнообразных климатических условиях. Это может быть морской климат и регионы с повышенным содержанием серы в воздухе, например, где ведётся добыча полезных ископаемых: газ, нефть. Влияние агрессивной среды атмосферы, преобладающей в этих регионах, способствует возникновению коррозионных повреждений деталей ГТД. Атмосферное воздействие, условия эксплуатации, дополнительное химическое воздействие, эрозионные факторы инициируют физико-химические процессы в материалах и способствуют их развитию. Как следствие, в процессе эксплуатации может произойти ускоренное снижение прочностных свойств деталей газотурбинной техники и последующее их преждевременное разрушение под действием силовых нагрузок и температуры.

При эксплуатации газотурбинных двигателей имели место случаи прекращения эксплуатации деталей не по выработке ресурса (малоцикловая усталость, трещиностойкость, длительная прочность и ползучесть), а вследствие коррозионных повреждений. На рис. 1 показаны сопловой аппарат первой ступени турбины высокого давления (ТВД) и рабочие лопатки первой ступени ТВД.



а



б

Рис. 1. Случаи прогара лопаток ГТД, инициированные коррозионным повреждением: а – сопловой аппарат первой ступени ТВД; б – рабочие лопатки первой ступени ТВД



Рис. 2. Дефлектор второй ступени ТВД

На двигателях разработки АО «ОДК-Авиадвигатель» были выявлены коррозионные повреждения следующих видов: высокотемпературное окисление (рабочая лопатка (РЛ) и силовая лопатка (СЛ) ТВД), сульфидно-оксидная коррозия (РЛ, СЛ, диски и дефлекторы ТВД), фреттинг-коррозия (диски и лопатки вентилятора, тяги, кронштейны задней подвески), язвенная коррозия (диски последних ступеней компрессора высокого давления) и сплошная коррозия (кожух внутренний, диффузор и диафрагма камеры сгорания).

В связи с постоянно повышаемыми параметрами рабочего процесса современных двигателей задача назначения ресурса в условиях воздействия коррозионных сред актуализируется. Температура газа за компрессором на перспективных разрабатываемых двигателях достигает 700°C. Эта температурная область является благотворной средой развития сульфидно-оксидной коррозии [1]. Пример такого коррозионного проявления наблюдался в начале эксплуатации двигателя ПС-90А в середине 90-х годов. Вследствие недостаточного охлаждения на дефлекторе диска второй ступени ТВД проявилась сульфидно-оксидная коррозия.

На рис. 2 сульфидно-оксидная коррозия проявляется тёмными пятнами. Коррозия появилась вследствие неправильно выбранной системы охлаждения дефлектора. В дальнейшем была изменена система охлаждения, вследствие чего не было возникновения повторных случаев сульфидно-оксидной коррозии на дефлекторе диска второй ступени ТВД.

Назначение ресурса деталей ГТД

В соответствии с мировыми тенденциями устанавливается и увеличивается только назначенный ресурс основных деталей двигателя на основании использования экспериментально обоснованных методов расчёта ресурса и статистических данных по конструкционной прочности материалов и опыта эксплуатации аналогичных конструкций.

Установление и увеличение назначенного ресурса основных деталей двигателя на основании использования экспериментально обоснованных методов расчёта ресурса и статистических данных по конструкционной прочности материалов и опыта эксплуатации аналогичных конструкций допустимо при следующих условиях:

1) наличие банка данных по конструкционной прочности материалов основных деталей, позволяющего дать надёжную статистически обоснованную оценку ресурса этих деталей с учётом влияния конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов;

2) экспериментальное подтверждение применяемого метода определения ресурса основных деталей с учётом характерных особенностей их конструкции, технологии изготовления и условий эксплуатации.

Таким образом, назначение ресурса современных ГТД выполняется расчётным методом с использованием банка данных по механическим характеристикам материалов. Аналогичным образом предлагается назначать ресурс деталей ГТД в условиях воздействия коррозионных сред.

Выполнен анализ разработок по определению ресурса деталей турбодвигателей в условиях воздействия коррозионной среды в России.

В Нормах прочности авиационных двигателей, а также корабельных газотурбинных установок (ГТУ) [2; 3] присутствуют требования о необходимости учёта влияния коррозионных сред на прочностные и ресурсные характеристики материалов и деталей ГТД. Однако нет никаких конкретных примеров или ссылок на методики и рекомендации о том, как это делать. В авиационных правилах АП-33 [4] присутствует требование защиты от коррозии деталей и агрегатов двигателя в эксплуатации и при хранении.

Также, согласно рекомендательному циркуляру [5], требуется учёт коррозии в системе прогнозирования циклического ресурса, но отсутствуют какие-либо указания о том, в чём конкретно выражается «защита от коррозии» и как учитывать коррозию при прогнозировании ресурса.

В настоящее время между предприятиями и институтами авиадвигателестроительной отрасли не существует единой законченной и верифицированной методологии оценки и назначения ресурса деталей и узлов ГТД и ГТУ при наличии произвольных коррозионных повреждений.

В Нормах прочности [6] атомной промышленности, а также в профильной литературе [7; 8] упоминаются требования и даются методические рекомендации по учёту влияния агрессивных сред на прочность и ресурс металлических деталей. Ведущей научной организацией в атомной промышленности в части прочности и ресурса является Институт машиноведения РАН им. А.А. Благонравова (ИМАШ РАН).

Наряду с ИМАШ РАН определёнными наработками в области ресурса деталей в условиях воздействия коррозионных сред [9] проточной части ГТД (лопатки, покрытия) владеет коллектив под руководством Л.Б. Гецова, работающий в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете (СПб ГПУ).

В работе «Влияние высокотемпературной коррозии на материалы турбинных лопаток морских газотурбинных двигателей» [10] коллектива под руководством Бегермана А.З. рассмотрены условия возникновения высокотемпературной солевой коррозии материалов турбин газотурбинных двигателей, влияние высокотемпературного окисления элементов жаропрочных сплавов на их физические свойства. В процессе эксплуатации происходит окисление и коррозия защитного покрытия на лопатках. Характеристики материалов изменяются. Эти данные показали, что в результате окисления коэффициент линейного расширения сплавов будет снижаться. Анализ взаимосвязи коэффициентов линейного расширения и теплопроводности жаропрочных сплавов отображён на рис. 3. Оба коэффициента сравнивались при одинаковых температурах. На рис. 3 приведены данные в диапазоне 300–900 °С. Из него следует, что если коэффициент линейного расширения сплава уменьшается, то будет уменьшаться и коэффициент теплопроводности. Предложено устройство контроля деградации материала турбин ГТД в эксплуатации.

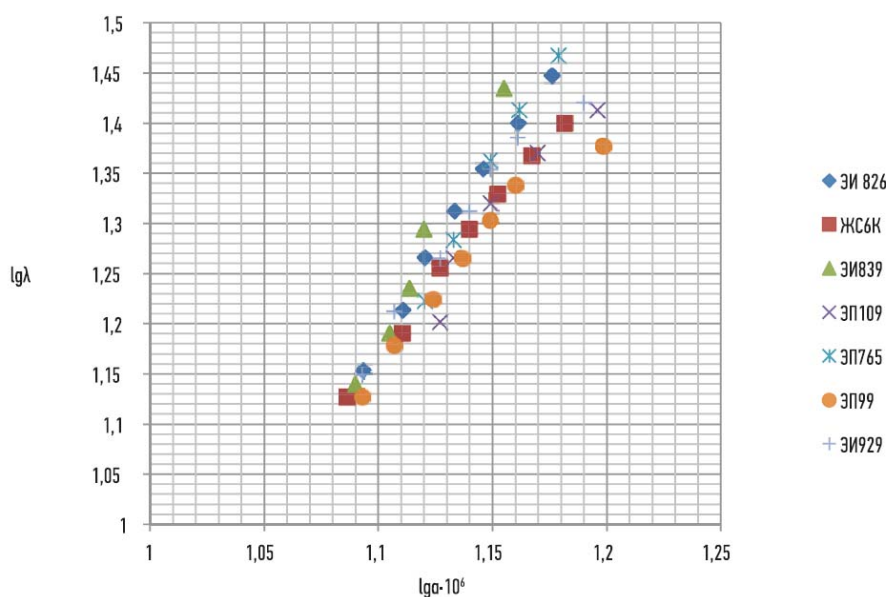


Рис. 3. Связь коэффициента теплопроводности и коэффициента линейного расширения жаропрочных сплавов при температурах 300–900 °С [10]

Таким образом, работы по коррозионной тематике в отрасли носят в основном качественный характер и сводятся к разработке конкретных мероприятий по замене материала и нанесению покрытий, снижающих коррозионное воздействие на детали в заданных условиях эксплуатации, без обоснования ресурса в условиях коррозии. Готовой методологии обеспечения ресурса деталей ГТД и ГТУ в условиях воздействия коррозионной среды в РФ не существует.

Среди иностранных авторов весомый вклад в изучение механизма коррозионного воздействия, зарождения и роста коррозионных повреждений и оценке риска разрушений детали внесла группа учёных из Политехнического университета Милана (отдел механического машиностроения) Стефано Беретта и Антониетта Ло Конте [11].

Стефано Беретта с коллегами на первом этапе проводят исследования механизма зарождения так называемых питтингов (углублений на поверхности металла, вызванных коррозионным воздействием). При исследовании материала с нанесённой коррозией строится диаграмма характеристик его дефектности. На рис. 4 по оси ординат показана величина вероятного дефекта в сплаве, а по оси абсцисс – площадь наблюдаемого дефекта. Величина вероятности наличия дефекта используется в расчёте при достижении трещины опасного размера. Также экспериментальным путём выявлен механизм возникновения трещин. Сперва появляются питтинги, затем формируются микротрещины и происходит их слияние. Далее образуются макротрещины, которые уже можно зафиксировать методами неразрушающего контроля. При этом исследовании была выявлена особенность питтингов обладать полусферической формой, показанной на рис. 5. Также авторы определяют коэффициент интенсивности напряжений в трещине, характеризующий переход от питтинга в трещину. На рис. 6 приведён график зависимости диаметра повреждения от вероятности появления в этом повреждении трещины в зависимости от размаха напряжений.

В настоящий момент времени АО «ОДК-Авиадвигатель» совместно с ФГУП «ВИАМ» и НПО «ЦКТИ» проводят совместные работы по разработке методологии назначения ресурса деталям в условиях воздействия коррозионных сред. Сформулированы подходы по разработке методологии назначения ресурса деталей в условиях воздействия коррозионной среды при эксплуатации двигателя.

Предлагаемая методология назначения ресурса в условиях воздействия коррозионных сред заключается в исследовании влияния коррозионного воздействия на длительную прочность, многоцикловую усталость, трещиностойкость и отдельно выделенную термоциклическую усталость. Также необходимо определение характеристик глубины проникновения коррозионного воздействия (диффузия) и характеристик площади коррозионного повреждения. Интуитивно понятно, что поверхностные повреждения деталей похожи на начальные дефекты, которые анализируются методом механики разрушения. Таким образом, необходимо преобразовать эти коррозионные повреждения в понятные начальные дефекты.

Модель назначения ресурса в условиях воздействия коррозионных сред можно разделить на несколько этапов. На первом этапе разрабатывается модель осаждения сульфатов на поверхность детали. На втором этапе под влиянием выдержки, напряжений на поверхности, температуры и толщины слоя сульфатов строится модель зарождения коррозионного повреждения, модель роста и объединения коррозионных повреждений и модель образования трещин. После этого выполняется этап оценки риска разрушения. Необходимо проводить исследовательские работы по исследованию механических характеристик материалов при нанесённом коррозионном повреждении и непосредственно в коррозионной среде. Одним из результатов этих исследовательских работ должно стать создание статистически обоснованного банка данных механических характеристик материалов с учётом влияния коррозионных сред.

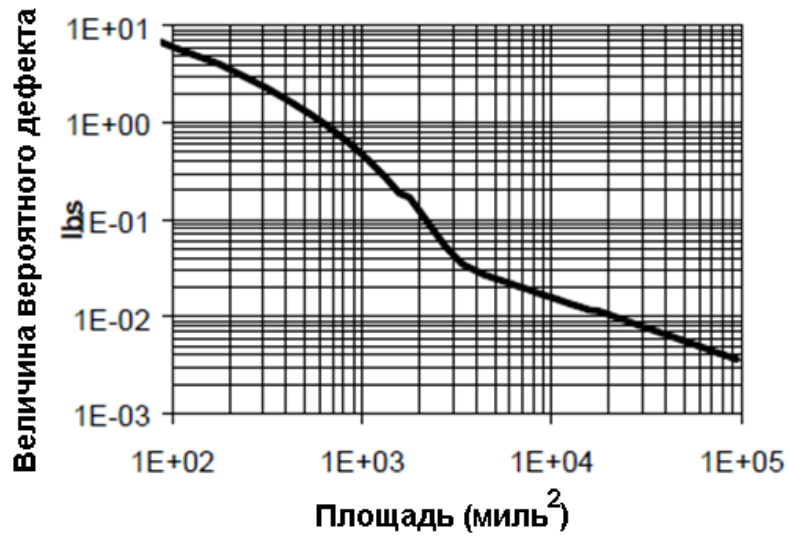


Рис. 4. Диаграмма характеристик дефектности материала [11]

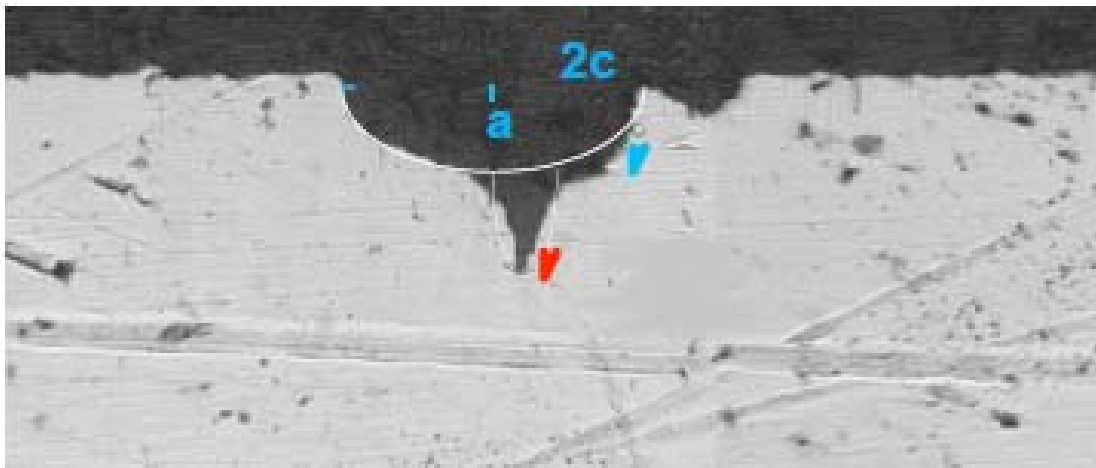


Рис. 5. Полусферическая форма питтинга [11]

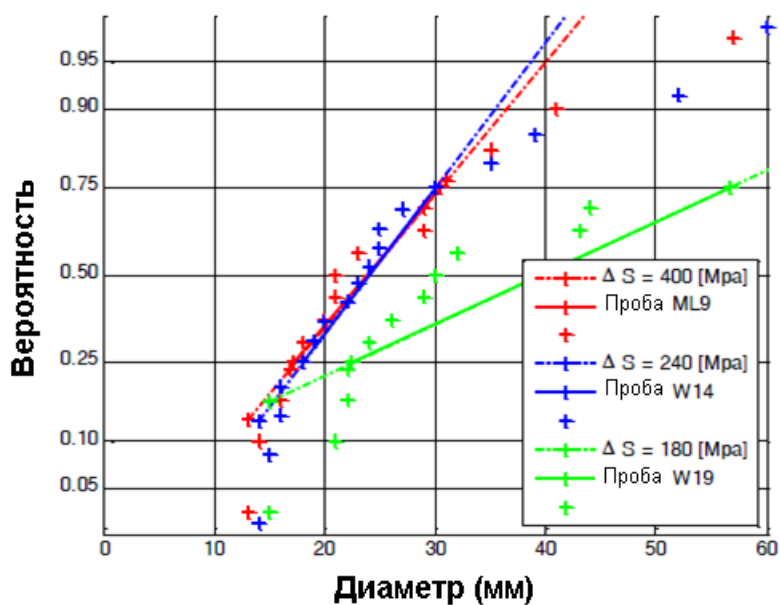


Рис. 6. График зависимости диаметра повреждения от вероятности появления в этом повреждении трещины в зависимости от размаха напряжений [11]

Заключение

Для разработки методики определения ресурса деталей ГТД в условиях воздействия коррозионных сред предлагается:

1. Экспериментальное определение влияния воздействия коррозионных сред на механические характеристики материалов с последующим созданием статистически обоснованного банка данных механических характеристик материалов с учётом влияния коррозионных сред.

2. Разработка и верификация математических моделей, описывающих появление и развитие коррозионных повреждений на детали до момента наступления предельного состояния детали.

Библиографический список

1. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. Т. 2. Компрессоры. Камеры сгорания. Форсажные камеры. Турбины. Выходные устройства. М.: Машиностроение, 2008. 365 с.

2. Нормы прочности авиационных газотурбинных двигателей гражданской авиации. М.: ЦИАМ, 2004. 260 с.

3. Нормы прочности корабельных и судовых ГТУ. СПб: ЦНИИ им. академика Крылова, 1986.

4. О введении в действие Рекомендательного циркуляра к Авиационным правилам, часть ВД «Нормы лётной годности вспомогательных двигателей воздушных судов» (АП-ВД). Межгосударственный авиационный комитет. Авиационный регистр (09-2004, 30.12.2004).

5. РЦ-АП-33.70-1. Методические материалы для реализации требований к основным деталям двигателя, ресурс которых устанавливается в циклах. Межгосударственный авиационный комитет. Авиационный регистр (03-2013, 27.11.2013).

6. Нормы расчёта на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86). М.: Энергоатомиздат, 1989. 525 с.

7. Несущая способность парогенераторов водо-водяных энергетических реакторов / под ред. Н.А. Махутова. М.: Наука, 2003. 440 с.

8. Проблемы прочности и безопасности водо-водяных энергетических реакторов / под ред. Н.А. Махутова, М.М. Гаденина. М.: Наука, 2008. 446 с.

9. Гецов Л.Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин. М.: Недра, 1996. 591 с.

10. Бегерман А.З., Конопатова А.В., Леонова И.П. Влияние высокотемпературной коррозии на материалы турбинных лопаток морских газотурбинных двигателей // Коррозия «Территории «НЕФТЕГАЗ». 2015. № 3 (32). С. 12-14.

11. Beretta S., Loconte A. Development of models for life prediction under corrosion-fatigue. <https://www.yumpu.com/en/document/view/19026365/development-of-models-for-life-prediction-under-corrosion-fatigue/35>

LIFE OF GAS TURBINE ENGINE COMPONENTS UNDER CORROSIVE EXPOSURE

© 2019

M. V. Pivovarova Design Engineer; Structural Analyst;
JSC “UEC-Aviadvigatel”, Perm, Russian Federation;
maria-assoll@yandex.ru

I. L. Gladkiy Candidate of Science (Engineering), Head of Department;
JSC “UEC-Aviadvigatel”, Perm, Russian Federation;
office@avid.ru

Currently, operation of gas turbine engines takes place in the aggressive medium of the atmosphere of some climatic regions. As a consequence, this may cause fast degradation of the strength properties of parts of gas turbine equipment and their subsequent premature failure. The problem of determining the life of gas turbine engine components under corrosive exposure is vital. We present an analysis of the state of the art in the field of assessment of gas turbine engine component life under the influence of corrosive environment in Russia and abroad. UEC-Aviadvigatel, FSUE “VIAM” and NPO “TSKTP” JSC formulated approaches to the development of the lifing process for engine parts operating in corrosive environment.

Gas turbine engine; component; life; damages; mechanical characteristics; mathematical modeling.

Citation: Pivovarova M.V., Gladkiy I.L. Life of gas turbine engine components under corrosive exposure. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2019. V. 18, no. 3. P. 109-117. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-3-109-117

Reference

1. Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.A., Sandratskiy V.L. *Osnovy konstruirovaniya aviatsionnykh dvigateley i energeticheskikh ustanovok. T. 2. Kompresory. Kamery sgoraniya. Forsazhnye kamery. Turbiny. Vychodnye ustroystva* [Principles of designing aircraft engines and power plants. V. 2. Compressors. Combustion chambers. Afterburners. Turbines. Output devices]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2008. 365 p.
2. Strength standards for civil aviation gas turbine engines. Moscow: CIAM Publ., 2004. 260 p. (In Russ.)
3. Strength standards for ship and marine gas turbines. SPb: TsNII im. akademika Krylova Publ., 1986. (In Russ.)
4. Enforcement of the Advisory Circular to Joint Aviation Requirements. Part 33. Airworthiness standards for auxiliary aircraft engines. Interstate Aviation Committee, Aviation Register, 2004. (In Russ.)
5. Recommendation circular RC-AP-33.70-1. Guidance materials for the implementation of requirements for the main parts of the engine, the life of which is set in cycles. (Project.) Interstate Aviation Committee, Aviation Register, 2013. (In Russ.)
6. Norms of strength calculation for the equipment and pipelines of nuclear power plants (PNAE Г-7-002-86). Moscow: Energoatomizdat Publ., 1989. 525 p. (In Russ.)
7. *Nesushchaya sposobnost' parogeneratorov vodo-vodyanykh energeticheskikh reaktorov / pod red. N.A. Makhutova* [Bearing capacity of steam generator of water-moderated power reactor / ed. by N.A. Makhutov]. Moscow: Nauka Publ., 2003. 440 p.
8. *Problemy prochnosti i bezopasnosti vodo-vodyanykh energeticheskikh reaktorov / pod red. N.A. Makhutova, M.M. Gadenina* [Strength and safety problems of water-moderated power reactors / ed. by N.A. Makhutov, M.M. Gadenin]. Moscow: Nauka Publ., 2008. 446 p.
9. Getsov L.B. *Materialy i prochnost' detaley gazovykh turbin* [Materials and strength of gas turbine parts]. Moscow: Nedra Publ., 1996. 591 p.

10. Begerman A.Z., Konopatova A.V., Leonova I.P. Influence of high-temperature corrosion on materials of turbine blades of marine gas turbine engines. *Korroziya «Territorii «NEFTEGAZ»*. 2015. No. 3 (32). P. 12-14. (In Russ.)

11. Beretta S., Loconte A. Development of models for life prediction under corrosion-fatigue. Available at: <https://www.yumpu.com/en/document/view/19026365/development-of-models-for-life-prediction-under-corrosion-fatigue/35>