

АНАЛИЗ ОТКАЗОВ И ПОВРЕЖДЕНИЙ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЗА ПЕРИОД 2007–2020 гг.

С. А. Дмитриев¹, Е. С. Симонова²

^{1,2} Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия
¹DmitrievSA@mai.ru, ²simonkat12@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Выяснить основные причины отказов авиационных двигателей, приведших к авиационным происшествиям или катастрофам. Выявить наиболее часто встречающиеся неисправности и причины их возникновения, проанализировать полученные данные. *Материалы и методы.* По данным открытых источников проведена оценка основных причин неисправностей, выявленных в процессе эксплуатации, сделаны заключения и даны пояснения по конкретным группам повреждений. *Результаты и выводы.* К основным причинам отказов авиационных двигателей, наиболее часто встречающихся в эксплуатации, относятся человеческий фактор и функциональные отказы. Результаты работы могут быть использованы при анализе конкретной неисправности в совокупности отказов, при разработке новых изделий и при составлении программ обеспечения надежности.

Ключевые слова: авиационные двигатели, газотурбинные двигатели, надежность, отказы авиационных двигателей, причины отказов авиационных двигателей, авиационные происшествия, прочность

Благодарности: авторы выражают благодарность Имаеву Тахиру Фатеховичу – сотруднику ФАУ «ЦИАМ им. П. И. Баранова» и старшему преподавателю кафедры «Конструкция и проектирование двигателей» МАИ Берне Аркадию Львовичу за консультации и значимые замечания.

Для цитирования: Дмитриев С. А., Симонова Е. С. Анализ отказов и повреждений авиационных двигателей за период 2007–2020 годы // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 81–90. doi:10.21685/2307-4205-2023-1-10

FAILURES AND DAMAGES OF AERO ENGINES FROM 2007 TO 2020

S.A. Dmitriev¹, E.S. Simonova²

^{1,2} Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia
¹DmitrievSA@mai.ru, ²simonkat12@yandex.ru

Abstract. *Background.* The paper discloses sources of the aero engine failures that caused aero accidents or crashes. Also are highlighted the data on sources of the most frequent failures. *Materials and methods.* On the base of published materials the work disclosed the main sources of failure occurred in operation. The conclusions evaluate and explain specific groups of failures. *Results and conclusions.* The most usual aero engine failures in operation are human factor and malfunction. The work results may be applied to analysis of specific failures within a set of malfunctions, development of new products and creation of the reliability ensuring programs.

Keywords: aircraft engines, gas turbine engines, reliability, aircraft engine failures, causes of aircraft engine failures, aviation accidents, durability

Acknowledgements: the authors express their gratitude to Imaev Tahir Fatekhovich, an employee of the FAU "CIAM named after P. I. Baranov" and senior lecturer of the Department "Design and Engineering of Engines" MAI Berne Arkady Lvovich for consultations and significant comments.

For citation: Dmitriev S.A., Simonova E.S. Failures and damages of aero engines from 2007 to 2020. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(1):81–90. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-1-10

Введение

Надежность силовой установки в значительной степени определяет эксплуатационные качества летательного аппарата. Цель данной статьи – проанализировать основные причины отказов авиационных двигателей (АД), приведших к авиационному происшествию (АП) или катастрофе. Выявить наиболее часто встречающиеся неисправности и причины их возникновения, проанализировать полученные данные авиационных происшествий.

По данным Межгосударственного авиационного комитета (МАК), в гражданской авиации государств-участников межгосударственного 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 [1].

По данным NTSB (*National Transportation Safety Board* – Национальный совет по безопасности транспорта), в США за аналогичный период произошло 83 авиационных происшествия, из них 23 – из-за отказа или повреждения двигателя, в том числе 9 катастроф с гибелью 216 человек [2].

Следует отметить, что фирмы-изготовители зачастую не публикуют данные по отказам, в особенности связанным с конструктивно-технологическими несовершенствами. Поэтому приведенный в статье анализ, основанный на опубликованных данных, не должен считаться исчерпывающе полным. Кроме того, зачастую наблюдается цепь взаимосвязанных отказов и повреждений, поэтому при их анализе важно разделять первопричину и следствие данного отказа.

Распределение по причинам отказов и повреждений, выявленных при эксплуатации воздушных судов за период 2007–2020 гг., приведено на рис. 1.



Рис. 1. Распределение по причинам отказов и повреждений, выявленных при эксплуатации воздушных судов за период 2007–2020 гг.

Анализ причин АП по причине отказа двигателя

Рассмотрим и сопоставим причины отказов двигателей по данным Межгосударственного авиационного комитета (МАК) и Национального совета по безопасности транспорта (NTSB).

Анализируя основные группы причин авиационных происшествий, произошедших из-за неисправности в двигателе, можно увидеть, что по отчетам МАК преобладающей причиной АП в связи с отказом либо повреждением двигателя является человеческий фактор – 39 %. При этом на прочностные и функциональные отказы и повреждения приходится 40 %. Что касается происшествий, разобранных по данным NTSB, из-за ошибок людей произошло 17 % авиационных происшествий, а из-за отказов и повреждений систем – 59 %. Наглядно эти данные представлены на рис. 2.



Рис. 2. Распределение по основным группам отказов и повреждений по данным МАК (а) и NTSB (б)

Рассмотрим более детально каждую группу и входящие в них причины (рис. 3). Для наглядности для каждой группы причины и их количество сведены в таблицы. По данным таблиц построены диаграммы (табл. 1, 2).



Рис. 3. Прочностные отказы и повреждения

Таблица 1

Прочностные отказы и повреждения (МАК)

Наименование	Количество
1. Усталостные трещины и разрушения на лопатках компрессора (КНД, КВД), замках и дисках, приведшие к обрыву лопатки или диска	1
2. Усталостные трещины и разрушения на лопатках турбины, дисках турбины (обрыв лопатки, разрушение диска ТВД, ТНД, свободной турбины)	1
3. Прогар жаровой трубы (вследствие коррозии под напряжением в условиях нагрева материала, усталостные трещины на элементах камеры сгорания)	4
4. Повреждение лопастей винта	1
5. Полное или частичное разрушение воздушного фильтра	1
6. Повреждение редуктора (планетарных подшипников первой ступени)	1
7. Выход из строя цилиндра двигателя (усталостные трещины, плохое закрепление) или заклинивание клапанов цилиндра	4
8. Разрушение одной из деталей поршне-шатунной группы (усталостные трещины и разрушения)	5

Таблица 2

Прочностные отказы и повреждения (NTSB)

Наименование	Количество
1. Усталостные трещины и разрушения на лопатках компрессора (КНД, КВД), замках и дисках, приведшие к обрыву лопатки или диска	3
2. Усталостные трещины и разрушения на лопатках турбины, дисках турбины (обрыв лопатки, разрушение диска ТВД, ТНД, свободной турбины)	1
3. Разрушение винта (его крепления, одной из его деталей)	1
4. Выход из строя цилиндра двигателя (усталостные трещины, плохое закрепление) или заклинивание клапанов цилиндра	2
5. Разрушение одной из деталей поршне-шатунной группы (усталостные трещины и разрушения)	2

Одной из основных причин отказов по прочности являются: усталостные трещины на разных деталях двигателя, приводящие к разрушению этой детали.

Трещины и обрывы лопаток компрессора и турбин встречаются практически на всех типах газотурбинных двигателей (ГТД). Подавляющее большинство поломок компрессорных лопаток и очень многие поломки турбинных лопаток имеют усталостный характер. Трещины, а также поломки небольших частей пера лопаток обнаруживаются большей частью при осмотрах двигателей. Обрывы значительной части лопатки обнаруживаются сразу же в процессе работы, приводят к повышенным вибрациям двигателя, могут приводить к помпам компрессора и серьезным вторичным разрушениям. Этот отказ требует немедленного выключения двигателя. Трещины и обрывы лопаток приводят к необходимости досрочного снятия двигателя с эксплуатации, если невозможна замена поврежденной лопатки в эксплуатационных условиях.

Трещины и разрушения дисков турбин и компрессоров относятся к наиболее опасным видам отказов, так как при обрыве части диска разрушения во многих случаях обычно не локализируются в пределах корпуса двигателя. Часто в процессе развития трещины в диске происходит возрастание уровня общих вибраций двигателя (с роторной частотой), что может служить диагностическим признаком этого отказа и при своевременном выключении двигателя позволяет предотвратить разрушение диска. При обнаружении трещины в диске двигатель должен, как правило, сниматься с эксплуатации. Особенно опасны разрушения турбинных дисков, так как они значительно массивнее компрессорных.

Трещины и прогары жаровых труб камер сгорания чаще всего могут быть обнаружены при осмотре двигателя эндоскопами. При значительных разрушениях жаровых труб их отделившиеся элементы конструкции могут повредить лопатки турбины. Поврежденные жаровые трубы или заменяются или, если дефект не развивается, могут при наличии регулярного контроля использоваться и далее. Повреждения жаровых труб обычно происходят от термических напряжений, вызываемых высокими градиентами температуры, а также резкими ее изменениями при запусках, приемистостях, остановках [3].

Функциональные отказы и повреждения

Виды функциональных отказов и повреждений систем отражены на рис. 4 и в табл. 3 и 4.



Рис. 4. Функциональные отказы и повреждения

Таблица 3

Функциональные отказы и повреждения (МАК)

Наименование	Количество
1. Потери газодинамической устойчивости и срыва пламени (погасания) в камерах сгорания при выполнении полета в условиях обледенения (в том числе обледенения карбюратора из-за неправильного управления теплом)	2
2. Повреждение топливной системе (переобогащение топливовоздушной смеси при включенных обогатителях карбюраторов, разрушение бензопровода при отделении двигателя от планера ВС, негерметичность ТС, отказ дополнительного электрического топливного насоса, повышенное сопротивление установленных бумажных топливных фильтров, образование воздушной пробки, оголение заборного устройства топливного бака, прекращение подачи топлива при отрицательных перегрузках, засорение фильтров, повреждение трубопровода)	15
3. Повреждение масляной системы (раздутие масляного бака)	1
4. Снижение тяги двигателя на взлетном режиме	1
5. Снижение мощности двигателя (несоответствие мощности на валу двигателя потребной для выполнения горизонтального полета)	2
6. Несогласованная работа двигателя, воздушного винта, регулятора постоянных оборотов и масла	1
7. Отказ системы охлаждения	1
8. Разрыв кинематической связи: главный редуктор – двигателя	1
9. Повреждение электроники (повреждения изоляции соединительного провода контактной группы магнето, ненормальная работа электронного блока управления двигателем, нарушения работоспособности электронного регулятора двигателя)	3

Таблица 4

Функциональные отказы и повреждения (NTSB)

Наименование	Количество
1. Повреждение электроники (трещины на микросхеме, выход из строя управляющего вала генератора переменного тока, отказ электронного блока управления двигателя (неисправность в батарейном отсеке ВСУ))	3
2. Повреждение масляной системы (масляное голодание из-за утечки или потери давления подачи масла в двигатель или загрязнения система подачи масла мусором или другой причины, выход из строя масляного насоса)	3
3. Отказ топливной системы (обледенение ТС)	4
4. Повреждение камеры сгорания	1

Очень важное значение в функционировании силовой установки имеют системы (масляная, топливная, охлаждения), обеспечивающие стабильную работу двигателя. Также работа двигателя непосредственно зависит от работы электронных систем, которые контролируют и регулируют параметры по тракту двигателя.

Во многих случаях отказы системы регулирования устраняются в эксплуатации заменой агрегатов или перерегулированием. Но возможны случаи, когда двигатель приходится досрочно снимать из-за отказов системы регулирования, например, при большом забросе температуры газа.

Человеческий фактор

Также к причинам отказов и повреждений систем относят человеческий фактор, более подробно раскрытый на рис. 5 и в табл. 5 и 6.



Рис. 5. Человеческий фактор

Таблица 5

Человеческий фактор (МАК)

Наименование	Количество
1. Ненадлежащее техническое обслуживание двигателя, ремонт или неправильная установка оборудования, которые привели к выходу из строя элементов двигателя	6
2. Нарушение правил эксплуатации	1
3. Осуществление сборки и обслуживания ВС не сертифицированными специалистами	6
4. Нарушение технологии и контроля качества при изготовлении двигателя и его элементов	2
5. Превышение сроков эксплуатации (в том числе за пределами межремонтного установленного срока)	1
6. Неверные действия службы эксплуатации ЛА и двигателей	4
7. Неверная подача топлива в двигатель (нехватка топлива во время полета, использование топлива низкого качества, обледенение топливной системы, загрязнение топливной системы, попадание воды в топливную систему)	7
8. Неверные действия пилота, инструктора или экипажа	13

Таблица 6

Человеческий фактор (NTSB)

Наименование	Количество
1. Ненадлежащее техническое обслуживание двигателя, ремонт или неправильная установка оборудования, которые привели к выходу из строя элементов двигателя	1
2. Превышение сроков эксплуатации (в том числе за пределами межремонтного установленного срока)	1
3. Неверная подача топлива в двигатель (нехватка топлива во время полета)	1
4. Неверные действия пилота, инструктора или экипажа	2

Для обеспечения безопасности полетов наземная инженерно-техническая служба и экипажи должны выполнять эксплуатацию техники в соответствии с предписанной документацией (инструкциями, регламентами, НПП (наставление по производству полетов)).

Другие причины отказов

Также следует обратить внимание на другие причины отказов и повреждений систем (рис. 6, табл. 7, 8).



Рис. 6. Другие причины отказов

Таблица 7

Другие причины отказов (МАК)

Наименование	Количество
1. Попадание в воздухозаборник постороннего предмета, в том числе птицы	4
2. Производственный дефект	1
3. Дросселирование двигателя, вследствие отказа системы управления (СУ)	1
4. Несогласованная работа двигателей	1
5. Помпаж двигателя	1
6. Выключение двигателей системой защиты свободной турбины	1
7. Причину выяснить не удалось (причина не может быть определена, либо не указана)	7

Таблица 8

Другие причины отказов (NTSB)

Наименование	Количество
1. Попадание в воздухозаборник постороннего предмета, в том числе птицы.	2
2. Производственный дефект	1
3. Причину выяснить не удалось (причина не может быть определена либо не указана)	1

Повреждение лопаток компрессора посторонними предметами является частой причиной досрочного съема двигателей. С мощной струей воздуха, засасываемого газотурбинным двигателем, различные твердые частицы могут попадать на вход в компрессор и, встречаясь с лопатками, имеющими окружные скорости до 400...500 м/с и выше, наносить им серьезные повреждения; эти повреждения (забоины) наиболее опасны на кромках в корневых сечениях [4]. Забоины на лопатках при их обнаружении тщательно выводятся. Если это невозможно без заметного снижения усталостной прочности лопатки, двигатель снимается для замены поврежденных лопаток. Попадающие в двигатель посторонние предметы могут повреждать не только первые ступени компрессора, но и проходить весь тракт, вплоть до последних ступеней.

Недостаточно тонкая фильтрация топлива, заправляемого в расходные баки объекта, на котором используется газотурбинный двигатель, – одна из частых причин отказов систем регулирования. Наличие механических примесей и воды в топливе пагубно сказывается на надежности прецизионных элементов (рис. 7, 8) [6].

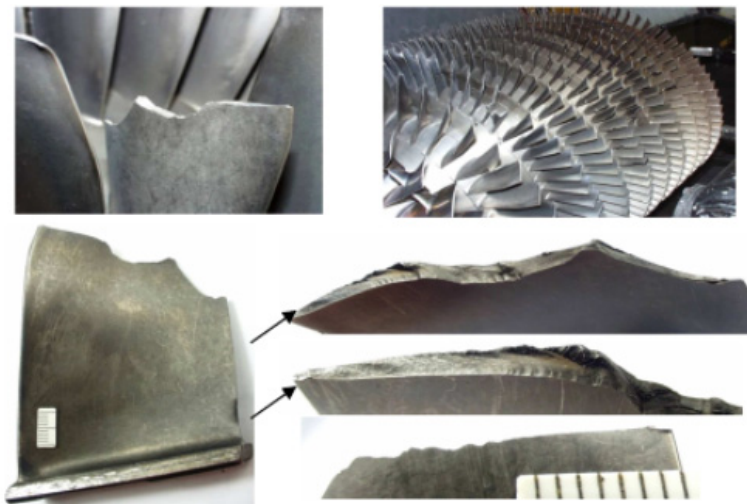


Рис. 7. Результаты повреждения газоздушного тракта двигателя по причине помпажа из-за обрыва пера лопатки 3-й ступени компрессора высокого давления в результате развития усталостного разрушения вследствие повреждения входной кромки лопатки посторонним предметом [3]

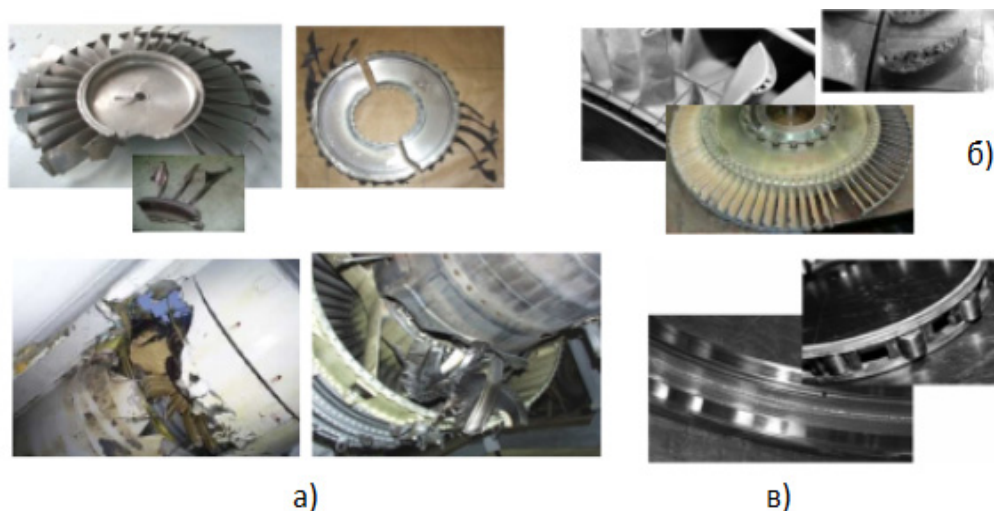


Рис. 8. Виды отказов авиационного газотурбинного двигателя 3-го поколения Д-30КУ-154, относящиеся к категориям: *а* – опасных или напрямую влияющих на безопасность полетов (разрыв дисков первой ступени компрессора низкого давления и первой ступени компрессора высокого давления); *б* – влияющих на выполнение задания и приводящих к досрочному съему двигателя с эксплуатации (обрыв рабочей лопатки 1-й ступени турбины высокого давления); *в* – износ (выкрашивание) беговых дорожек и роликов межвального подшипника турбины [3]

Заключение

В настоящее время анализ безопасности конструкции (*Safety Analysis*) или анализ рисков (*Risk Analysis*) разрабатываемой (модернизируемой) конструкции становится обязательным требованием процедуры сертификации типа газотурбинного двигателя (ГТД) коммерческой транспортной авиации и ГТД промышленного применения [3].

На основе представленных данных можно выделить ряд основных или наиболее часто повторяющихся причин отказов. К таковым относятся: усталостные трещины и разрушения дисков и лопаток компрессоров и турбин, трещины и прогары жаровых труб камер сгорания, повреждение и отказы элементов топливной системы, повреждение электросистем, повреждение лопаток компрессора посторонними предметами.

Так как при эксплуатации авиадвигателей в значительном числе случаев имеет место циклическое нестационарное нагружение, то для наиболее нагруженных их зон становится характерным наличие как статических, так и циклических упругих и упругопластических деформаций. При таких режимах деформирования анализ условий образования предельных состояний в материале по воз-

никновению трещин или по окончательному разрушению в процессе проектирования является необходимым этапом в процедурах обоснования безопасных параметров последующей эксплуатации.

В общем случае анализ повреждаемости узлов и агрегатов авиадвигателей в процессе эксплуатации и условий их перехода в критические предельные состояния в результате многофакторных иницирующих воздействий основывается на расчетно-экспериментальных методах определения прочности, ресурса, надежности, живучести и безопасности (рис. 9).



Рис. 9. Структура анализа условий достижения предельных состояний

Если при отработке двигателя преимущественно проявляется какой-то определенный отказ, то это обычно является основанием для перепроектирования соответствующего элемента с целью устранения причины, вызывающей этот отказ. Поэтому обычно трудно назвать несколько каких-то типичных причин отказов, которые можно было бы считать ведущими причинами отказов ГТД. Вследствие высокой напряженности элементов конструкции газотурбинного двигателя, интенсивности тепловых и газодинамических процессов, в нем происходящих, сложности системы автоматического управления двигателем при эксплуатации ГТД разных типов приходится сталкиваться с большим многообразием причин отказов. На практике приходится иметь дело с причинами отказов ГТД, связанными с прочностью (статической и динамической) нагруженных деталей, с рабочим процессом в основных узлах двигателя, с характером процессов его управления, со свойствами элементов, входящих в системы двигателя (такие как системы смазки, регулирования, топливопитания, зажигания и др.), с особенностями его производства, с характером его эксплуатации. Теоретически выделяют нескольких больших групп причин отказов – конструктивных, производственно-технологических и т.д. На практике в ряде случаев бывает трудно четко разделить эти причины. Например, поломка какой-либо детали может быть связана с тем, что к ее недостаточной конструкционной прочности добавилось какое-то производственное отклонение. Не всегда удается однозначно квалифицировать физическую причину отказа. Учитывая указанные обстоятельства, дать сколь угодно строгую и полную квалификацию физических причин отказов ГТД затруднительно [3].

В результате работы выявлены и проанализированы основные причины отказов авиационных двигателей, наиболее часто встречающиеся неисправности и причины их возникновения. Работу такого типа необходимо проводить периодически для получения полноценных и достоверных данных в текущий момент времени, использовать полученные материалы при анализе конкретной неисправности в совокупности отказов, при разработке новых изделий и при составлении программ обеспечения надежности.

Список литературы

1. Фролов М. А. Повышение надежности информационно-измерительной управляющей системы двигательной установки // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 2. С. 47–53.
2. Болознев В. В., Застела М. Ю., Мирсаитов Ф. Н. К проблеме функциональной диагностики гозотурбинного двигателя по спектрам 3D-вибраций // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 1. С. 79–85.
3. Сарычев С. В. Методологические основы оценки технических рисков системы управления безопасностью полетов при проектировании, производстве и серийной эксплуатации ГТД : дис. ... д-ра техн. наук. М., 2002.
4. Лаврик В., Рубцов И., Шершер Э. Летчик, внимание – птицы! М. : Воениздат, 1970.
5. Махутов Н. А., Гаденин М. М., Романов А. Н. Фундаментальные основы определения прочности, ресурса, живучести и безопасности авиадвигателей // Авиадвигатели XXI века : Всерос. науч.-техн. конф. (Москва, ЦИАМ имени П. И. Баранова, 24–27 ноября 2015 г.). М., 2015. С. 467–469.
6. Махутов Н. А. Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования. Новосибирск : Наука, 2008. 528 с.

References

1. Frolov M.A. Improving the reliability of the information and measurement control system of the propulsion system. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2015;(2):47–53. (In Russ.)
2. Boloznev V.V., Zastela M.Yu., Mirsaitov F.N. On the problem of functional diagnostics of a gas turbine engine by 3D vibration spectra. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2016;(1):79–85. (In Russ.)
3. Sarychev S.V. Methodological foundations of the assessment of technical risks of the flight safety management system in the design, production and serial operation of the gas turbine engine. DSc dissertation. Moscow, 2002. (In Russ.)
4. Lavrik V., Rubtsov I., Shersher E. *Letchik, vnimanie – ptitsy! = Pilot, attention – birds!* Moscow: Voenizdat, 1970. (In Russ.)
5. Makhutov N.A., Gadenin M.M., Romanov A.N. Fundamental principles of determining the strength, resource, survivability and safety of aircraft engines. *Aviadvigateli XXI veka: Vseros. nauch.-tekhn. conf. (Moskva, TsIAM imeni P.I. Baranova, 24–27 noyabrya 2015 g.) = Aircraft engines of the XXI century : All-Russian scientific-technical. conf. (Moscow, CIAM named after P. I. Baranov, November 24–27, 2015)*. Moscow, 2015:467–469. (In Russ.)
6. Makhutov N.A. *Prochnost' i bezopasnost': fundamental'nye i prikladnye issledovaniya = Strength and safety: fundamental and applied research*. Novosibirsk: Nauka, 2008:528. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Сергей Александрович Дмитриев

старший преподаватель, заведующий лабораторией кафедры конструкции и проектирования двигателей, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4)
E-mail: DmitrievSA@mai.ru

Sergey A. Dmitriev

Senior lecturer, head of the laboratory of the sub-department of engine design and engineering, Moscow Aviation Institute (National Research University) (4 Volokolamskoe highway, Moscow, Russia)

Екатерина Сергеевна Симонова

студентка, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (Россия, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4)
E-mail: simonkat12@yandex.ru

Ekaterina S. Simonova

Student, Moscow Aviation Institute (National Research University) (4 Volokolamskoe highway, Moscow, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 15.12.2022

Поступила после рецензирования/Revised 20.01.2023

Принята к публикации/Accepted 10.03.2023