

УДК 629.735

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-1-174-184

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ РАБОЧИХ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРОВ ДВУХКОНТУРНЫХ ТУРБОРЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Б.А. ЧИЧКОВ¹, М.А. ЗАЯЦ¹

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

Авиационные газотурбинные двигатели в процессе эксплуатации подвержены повреждениям проточных частей. Элементами конструкции двигателей, в значительной мере определяющими их эксплуатационные характеристики, являются рабочие лопатки. Характер типичных повреждений для различных типов двигателей зависит от назначения и места эксплуатации воздушного судна, на котором установлен тот или иной двигатель. Например, для турбовальных двигателей, эксплуатируемых в условиях запыленного воздуха, наибольшую проблему представляет эрозионный износ пера рабочих лопаток. Среди основных причин повреждений проточных частей компрессоров турбореактивных двухконтурных двигателей выделяются повреждения от попадания посторонних предметов. Особняком стоят повреждения, вызванные усталостью материала рабочих лопаток при опасных резонансных колебаниях. Посторонние предметы могут попасть в двигатель с взлетно-посадочной полосы; кроме того, опасность представляют куски льда, образовавшегося во входном устройстве, птицы и т. п. В роли предметов, попадающих в двигатель с взлетно-посадочной полосы, выступают куски бетона взлетно-посадочной полосы, льда, гайки, болты, куски протекторов шин, контрольная проволока и подобные элементы от ранее взлетавших воздушных судов. Попадание посторонних предметов в двигатель зависит как от режима работы (при работе на месте, при гонке, на взлете, при пробеге на посадке с использованием реверсивного устройства и т. п.), так и от расположения двигателя на воздушном судне.

При этом предметы, попавшие в проточную часть двигателей, повреждают лопатки каскада как низкого, так и высокого давления. Результаты взаимодействия предметов, попавших в проточную часть двигателя, с рабочими лопатками выражаются в появлении забоин по кромкам, перу и антивибрационным полкам (при наличии) лопаток, деформациях кромок, обрывам, отгибам периферийных частей и распределяются «нелинейно» по длине тракта (ступеням).

В статье приводятся результаты статистического анализа повреждаемости компрессоров двигателей трех типов за период более трех лет. Рассмотрены распределения видов повреждений по типам двигателей в целом и их отдельным ступеням, глубин и длин повреждений по кромкам внутри ступеней и положения мест повреждений от торца рабочих лопаток, в зависимости от времени года в целом по узлам и по ступеням. Результаты анализа позволяют выработать рекомендации к проведению процедур оптико-визуального контроля.

Ключевые слова: авиационный двигатель, анализ статистический, компрессор, контроль оптико-визуальный, лопатки рабочие, проточная часть, повреждения.

ВВЕДЕНИЕ

Среди основных причин повреждений проточных частей компрессоров турбореактивных двухконтурных двигателей выделяются повреждения от попадания посторонних предметов. Особняком стоят повреждения, вызванные усталостью материала рабочих лопаток при опасных резонансных колебаниях. Попадание посторонних предметов в двигатель зависит как от режима работы (при работе на месте, при гонке, на взлете, при пробеге на посадке с использованием реверсивного устройства и т. п.), так и от расположения двигателя на воздушном судне [1–5].

Некоторые виды повреждений рабочих лопаток показаны на рис. 1. На рис. 1: a – забоин на характерные размеры: A – длина забоины, B – глубина забоины, измеряемая по хорде профиля, B – расстояние от периферийного торца лопатки до середины забоины; b – вмятина: A – длина вмятины, измеряемая вдоль входной кромки лопатки, B – максимальная глубина вмятины (измеряется в плоскости профиля пера лопатки перпендикулярно входной кромке), B – расстояние от периферийного торца лопатки до середины вмятины (измеряется вдоль вход-

ной кромки лопатки), Γ – максимальная ширина вмятины (измеряется по поверхности профильной части со стороны спинки или корыта перпендикулярно входной кромке лопатки); ϵ – погнутость (отгиб уголка): A – величина отогнутой части профиля лопатки, измеряемая вдоль входной (выходной) кромки; B – величина отклонения вершины угла лопатки; B – величина отогнутой части профиля лопатки, измеряемая по периферийной кромке лопатки.

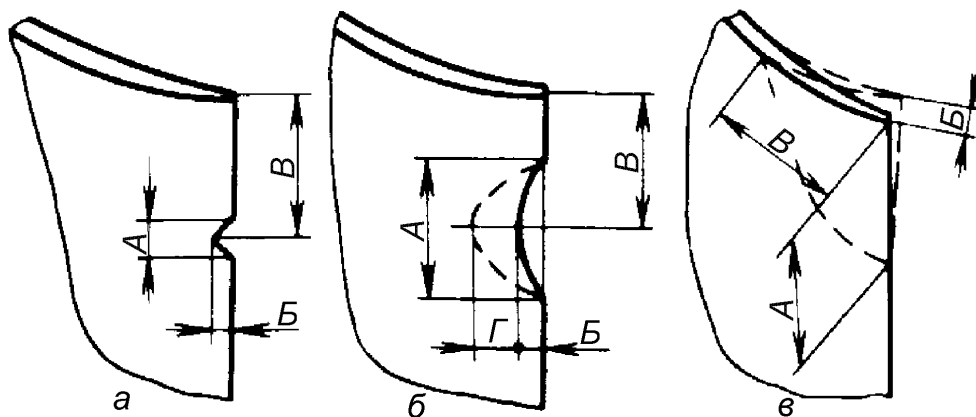


Рис. 1. Виды повреждений кромок, вершушек (концевых частей) лопаток и их характеристики
Fig. 1. Damage kinds of edges, (trailer parts) blades tops and their characteristics

В настоящее время осмотр и оценка повреждений рабочих лопаток двухконтурных турбореактивных двигателей (ТРДД) выполняется оптико-визуальным методом. Эндоскопическое оборудование различных производителей позволяет осматривать практически всю проточную часть двигателя через смотровые лючки и обеспечивает возможность фото- и видеофиксации. Вывод о возможности дальнейшей эксплуатации двигателя с выявленным повреждением (-ями), влиянии на безопасность полета и предполагаемом остаточном ресурсе поврежденной детали делается по результатам сравнения обнаруженных повреждений с описаниями допустимых и недопустимых повреждений, приводимыми в нормативных документах. По окончании работы специалист оформляет протокол установленного образца и заносит данные о повреждении в базу данных, указывая тип и номер воздушного судна (ВС), номер двигателя, номер силовой установки (СУ), ступени, лопатки, краткую характеристику и размер повреждения. Эти данные образуют основу типовых баз данных, формируемых в эксплуатационных предприятиях.

Статья ставит целью дать представление об актуальном распределении эксплуатационных повреждений рабочих лопаток компрессоров ТРДД трех двигателей разных производителей (далее – тип 1, тип 2 и тип 3) за период около трех с половиной лет.

ОСОБЕННОСТИ АНАЛИЗА ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ЛОПАТОК

Анализ повреждаемости лопаток может быть выполнен как по статистическим данным, так и по результатам математического моделирования.

В объеме настоящей статьи предпринята попытка в основном лишь статистического анализа распределения повреждений рабочих лопаток [5] и установленных связей особенностей этих распределений с особенностями конструкций двигателей и условий эксплуатации [1, 5]. Анализ реализует объектный подход методов анализа систем [6] и известные методы математической статистики и анализа данных работ [7, 8] с целью установления частот различных событий повреждений лопаток, оценки их частоты относительно средних значений и аппроксимаций полученных распределений частот (только как примеры, здесь без детального разбора). Отметим, что в работе [3] представлены результаты математического моделирования повреждаемости проточной части ТРДД, а в работе [9] – оценка влияния поврежде-

ний на характеристики двигателей. Отличием излагаемых ниже материалов от ранее выполненных работ является то, что они получены для трех типов двигателей на базе данных с более чем 650 записями и включают результаты анализа распределения конкретных видов повреждений, размеров повреждений и мест положения повреждений. Анализ удобно проводить в Excel [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты анализа состава типовых повреждений рабочих лопаток и их количества в относительном – ОКП (относительное количество повреждений – относительно суммарного числа повреждений по типу) – выражении представлены на рис. 2.

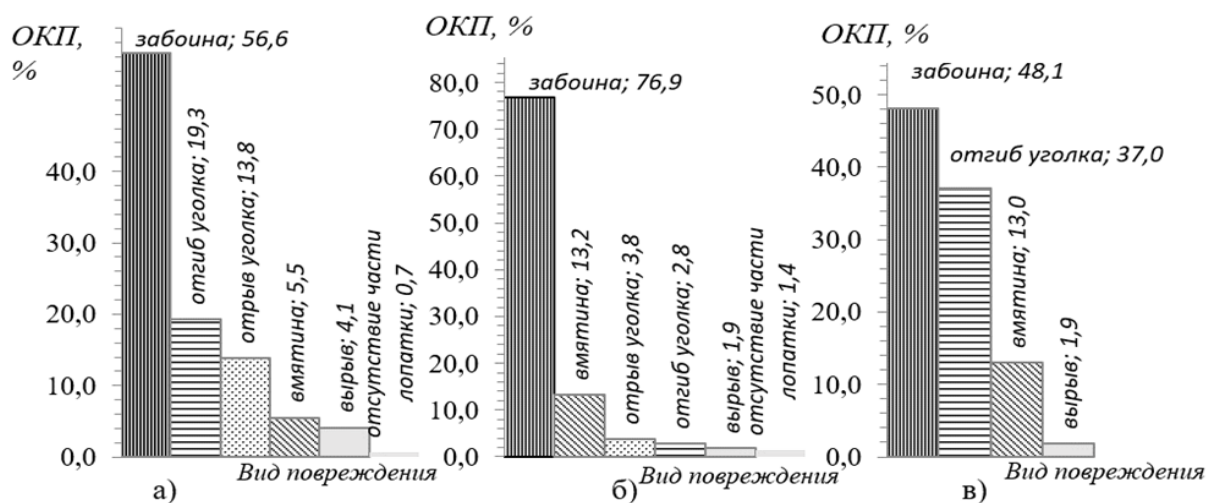


Рис. 2. Распределение видов повреждений рабочих лопаток компрессора:

а – двигатель типа 1; б – двигатель типа 2; в – двигатель типа 3

Fig. 2. Distribution of damage kinds of compressor blades:

а – type 1 engine; б – type 2 engine; в – type 3 engine

Очевидно, что чаще других на рабочих лопатках образуются забоины. У двигателя типа 1 доля забоин составляет 56,6 %, у двигателя типа 2 – 76,9 %, у двигателя типа 3 – 48,1 %. Забоины – это одно из характерных повреждений при попадании в двигатель посторонних предметов, часто кусков льда.

Отметим, что из-за конструктивных особенностей у двигателя типа 3 частыми повреждениями являются отгибы уголков лопаток (в 37,0 % случаев). Нередко на лопатках образуются вмятины. У двигателя типа 1 доля вмятин составляет 5,5 %, у двигателя типа 2 – 13,2 %, у двигателя типа 3 – 13,0 %.

Остальные виды повреждений (вырыв, отрыв уголка или части лопатки), вызванные более крупными и/или твердыми посторонними предметами, происходят значительно реже.

Распределение повреждений между ступенями представлено на рис. 3–5.

В целом у двигателей типа 1 и 3 забоины и отгибы уголков часто происходят на первой ступени (20,7 и 14,8 % соответственно). Доля повреждений увеличивается на дальних ступенях, начиная с 9 ступени. У двигателя типа 2 наблюдается сравнительно низкое количество повреждений на 1 ступени – 2,8 % от общего числа повреждений. При этом на 3–9 ступенях часто обнаруживаются забоины и вмятины. Возможно, подобное распределение повреждений объясняется большей степенью двухконтурности двигателей типа 1 и 3. Особо следует отметить значительную повреждаемость лопаток 3 ступени двигателей типа 2. У двигателя типа 3 часто происходят отгибы уголка как на первой, так и на дальних ступенях.

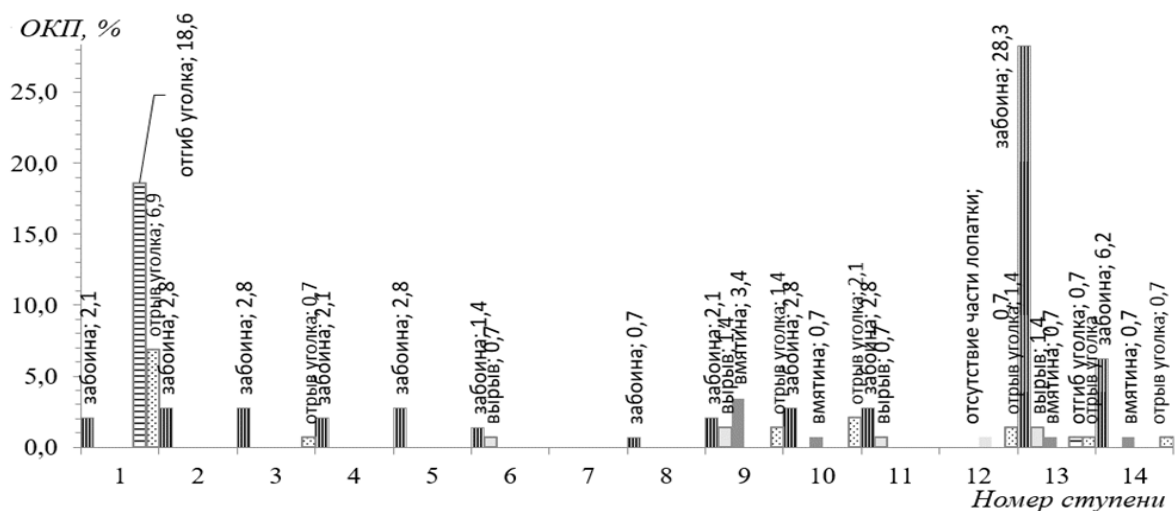


Рис. 3. Распределение видов повреждений по ступеням для двигателя типа 1
Fig. 3. Distribution of damage kinds on stages for type 1 engine

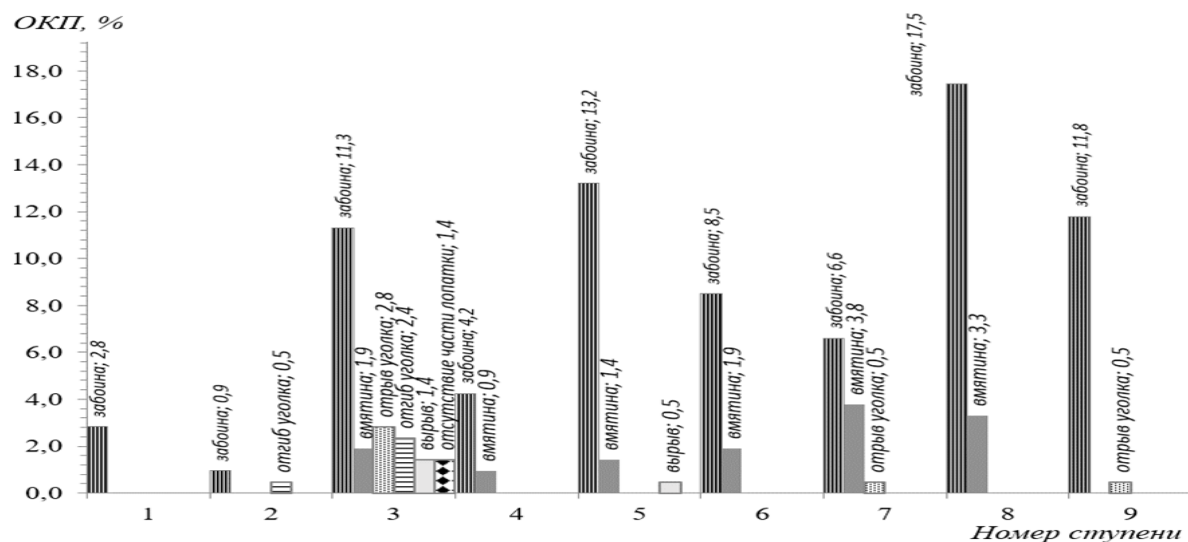


Рис. 4. Распределение видов повреждений по ступеням для двигателя типа 2
Fig. 4. Distribution of damage kinds on stages for type 2 engine

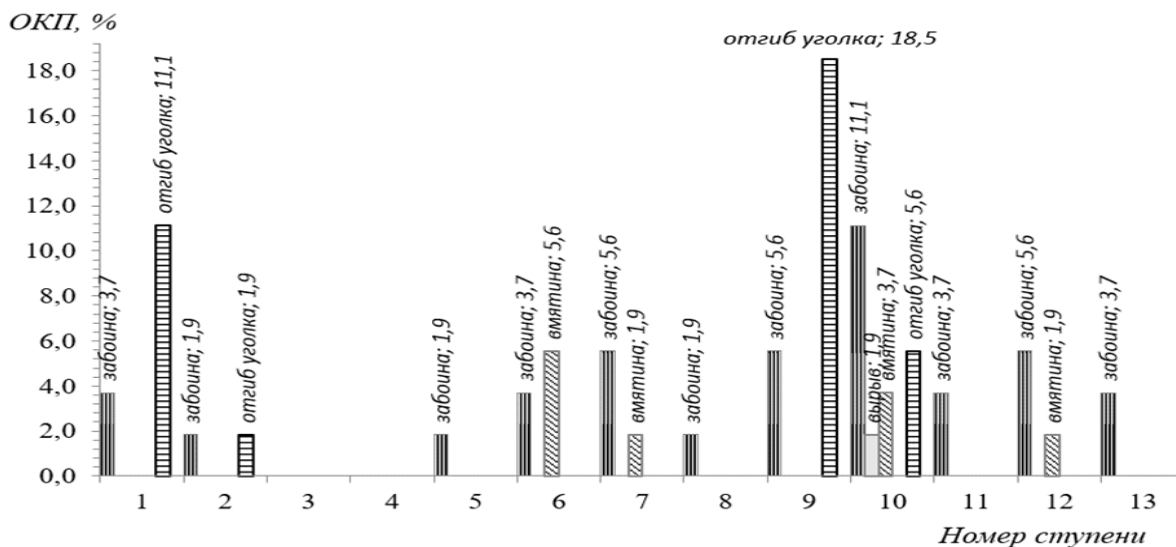


Рис. 5. Распределение видов повреждений по ступеням для двигателя типа 3
Fig. 5. Distribution of damage kinds on stages for type 3 engine

Чтобы иметь возможность предположить источник повреждений рабочих лопаток, проанализированы глубина и длина повреждений (рис. 6–8). Штриховыми линиями показаны средние значения ОКП и геометрических характеристик повреждений.

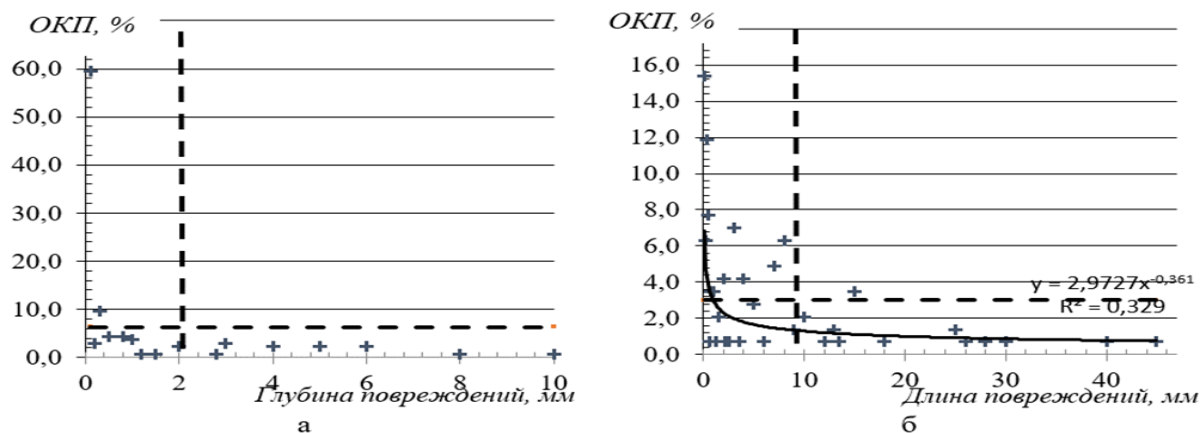


Рис. 6. Распределение глубины (а) и длины (б) повреждений рабочих лопаток компрессора двигателя типа 1

Fig. 6. Distribution of depth (a) and length (б) of type 1 engine compressor blades damage

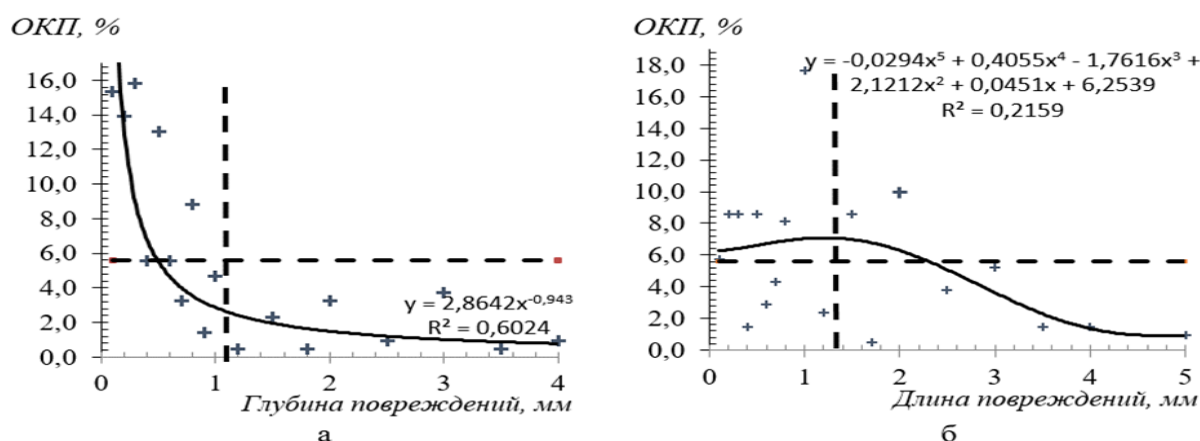


Рис. 7. Распределение глубины (а) и длины (б) повреждений рабочих лопаток компрессора двигателя типа 2

Fig. 7. Distribution of depth (a) and length (б) of type 2 engine compressor blades damage

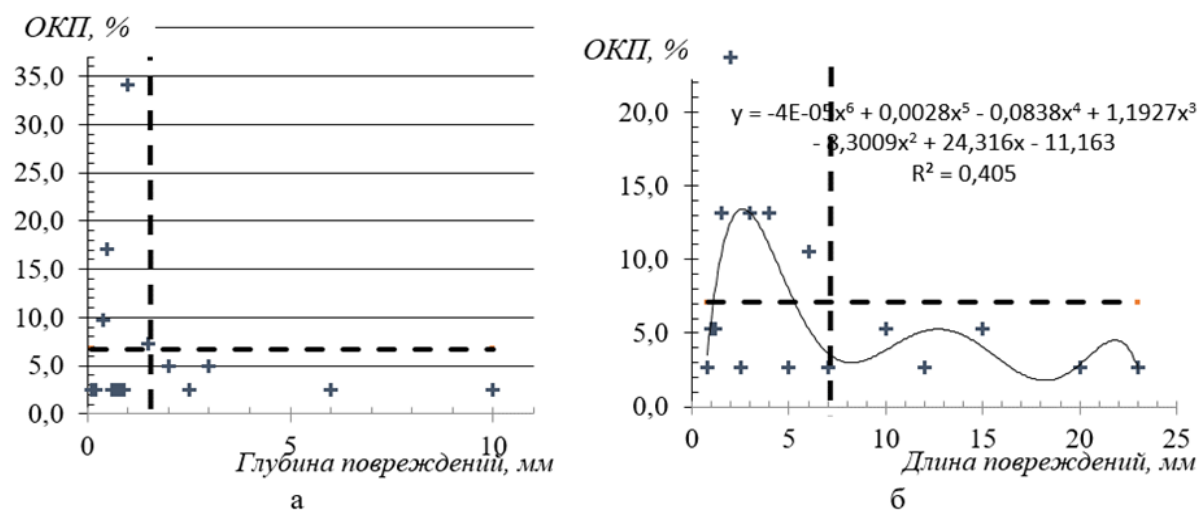


Рис. 8. Распределение глубины (а) и длины (б) повреждений для двигателя типа 3

Fig. 8. Distribution of depth (a) and length (б) of type 3 engine compressor blades damage

Анализ глубины повреждений показывает, что глубина большинства повреждений на всех двигателях не превышает 1 мм (вид повреждений – забоины, вмятины). Максимальная глубина повреждений у двигателей 1 и 3 типов в единичных случаях составила 10 мм, у двигателя типа 2 – 4 мм. В этих случаях вид повреждения – отгиб уголка.

Длина большинства повреждений на двигателях 1 и 3 типов не превышает 6–8 мм, у двигателя типа 2 большинство повреждений имеет размер до 3 мм. Опираясь на полученные результаты анализа глубины и длины повреждений можно сделать вывод, что большинство повреждений рабочих лопаток происходит из-за попадания в проточную часть кусочков льда, реже небольших камней. Попадания крупных предметов, например птиц, носит более редкий характер, но наносит более крупные по глубине и длине повреждения.

Для определения наиболее повреждаемой зоны рабочих лопаток компрессора выполнен анализ повреждений по высоте и профилю лопаток.

Распределение повреждений по кромкам лопаток внутри ступеней представлено на рис. 9–11.

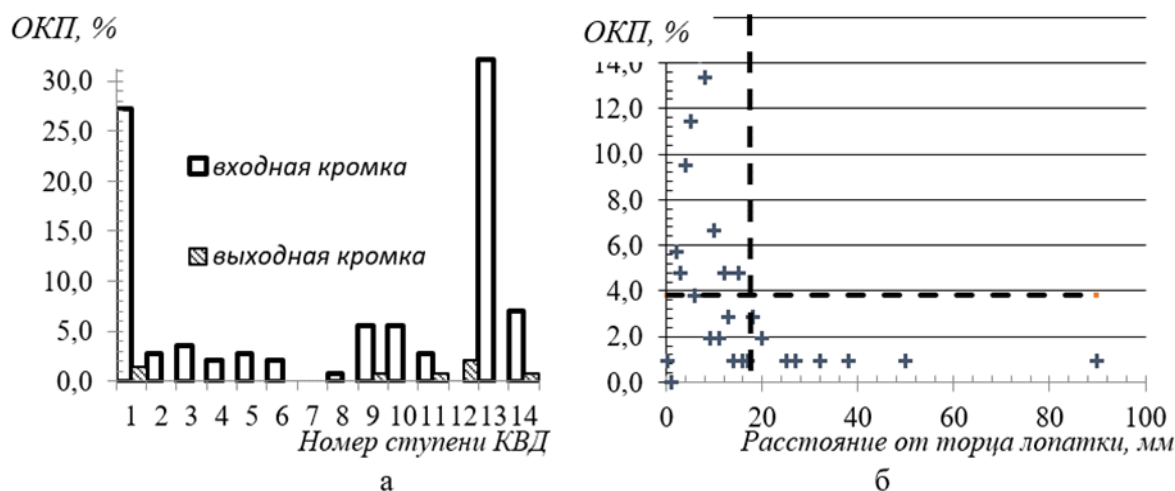


Рис. 9. Распределение повреждений рабочих лопаток компрессора по кромкам внутри ступеней (а) и положения мест повреждений от торца рабочих лопаток (б) компрессоров двигателей типа 1
Fig. 9. Distribution of compressor blades damage on edges inside stages (a) and positions of damage places from blade tips (b) of engine type 1 compressors

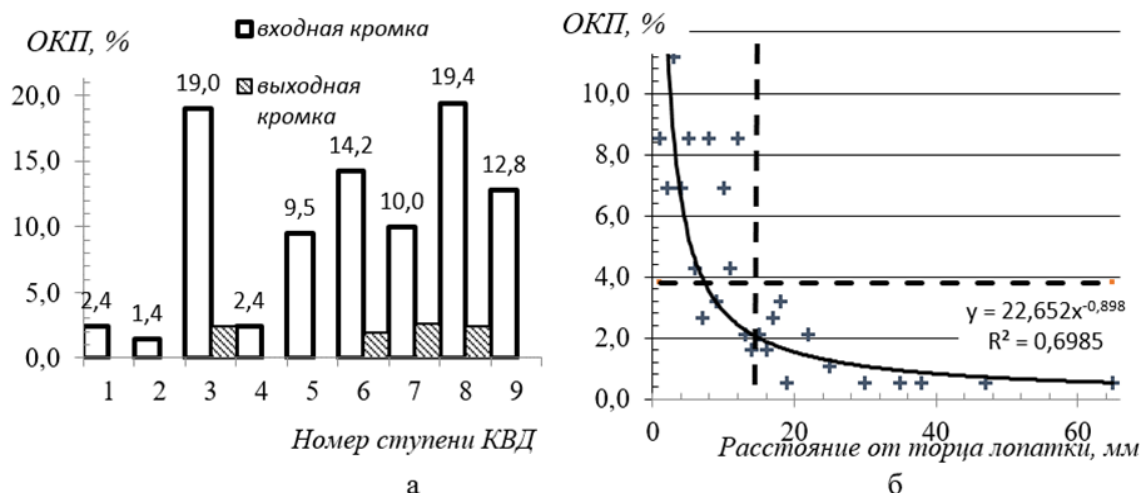


Рис. 10. Распределение повреждений рабочих лопаток компрессора по кромкам внутри ступеней (а) и положения мест повреждений от торца рабочих лопаток (б) компрессоров двигателей типа 2
Fig. 10. Damage distribution of compressor blades on edges inside stages (a) and positions of damage places from blade tips (b) of engine type 2 compressors

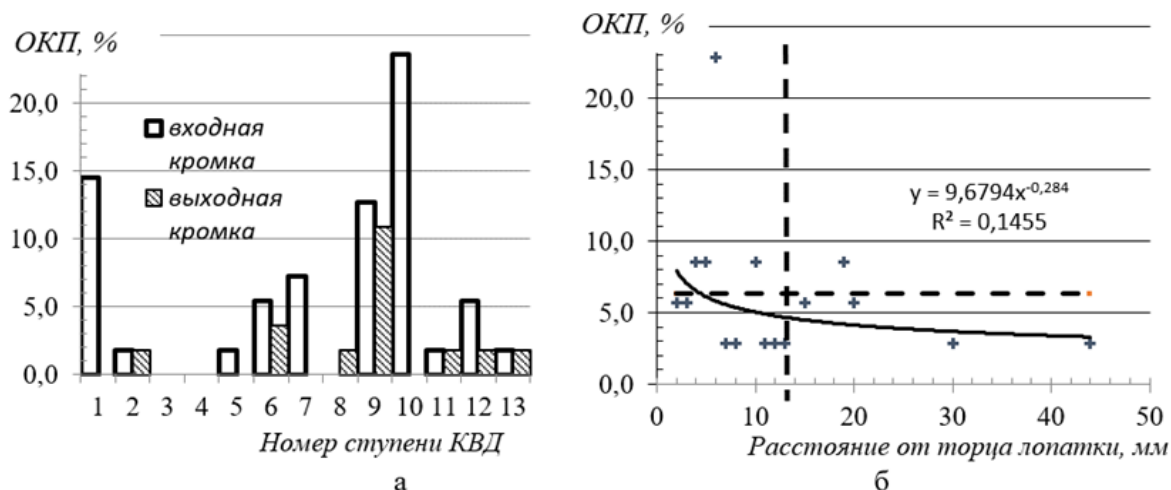


Рис. 11. Распределение повреждений рабочих лопаток компрессора по кромкам внутри ступеней (а) и положения мест повреждений от торца рабочих лопаток (б) компрессоров двигателей типа 3

Fig. 11. Damage distribution of compressor blades on edges inside stages (a) and positions of damage places from blade tips (б) of engine type 3 compressors

Установлено, что в подавляющем большинстве случаев повреждение рабочих лопаток компрессора происходит в зоне входной кромки: двигатель типа 1 – 94,4 % случаев, двигатель типа 2 – 91,0 % случаев, двигатель типа 3 – 76,4 % случаев.

На первой ступени всех типов двигателей повреждения находятся со стороны входной кромки. Однако на дальних ступенях (9–14 ступень) единичные повреждения наблюдались и со стороны выходной кромки пера.

Распределение эксплуатационных повреждений по высоте пера рабочих лопаток показывает, что они располагаются, как правило, в верхней трети пера лопатки. Большинство повреждений получено на расстоянии до 15 мм от торца лопатки. Для двигателей типа 2 распределение повреждений от торца лопатки описывается значимой степенной зависимостью (рис. 10, б).

Следующий анализ выполнен для выявления закономерности распределения повреждений лопаток в зависимости от времени года. Результаты представлены на рис. 12–14.

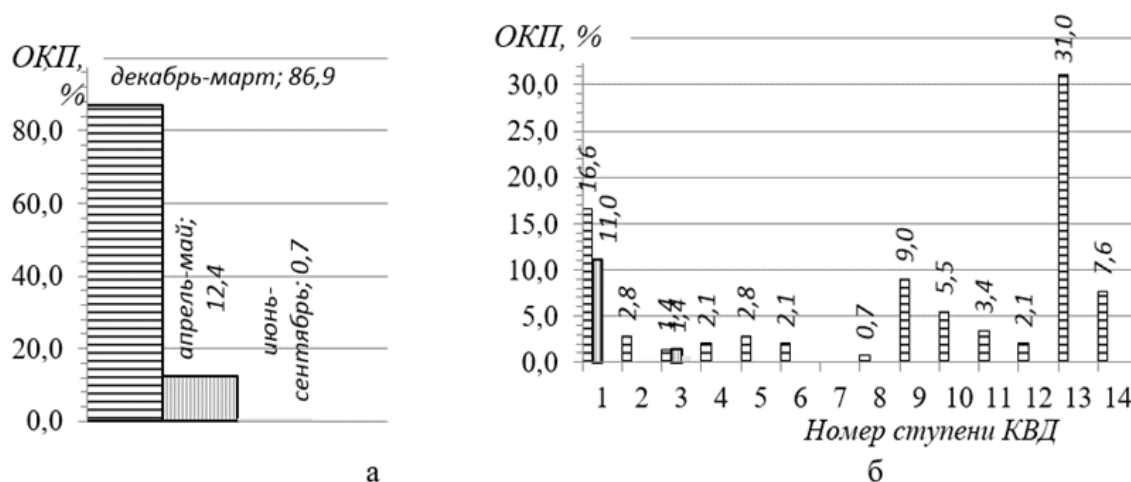


Рис. 12. Повреждаемость рабочих лопаток компрессора по узлу в целом (а) и ступеням (б) в зависимости от времени года для двигателя типа 1

Fig. 12. Fault probability of compressor blades in the whole unit (a) and on stages (б) depending on season time for type 1 engine

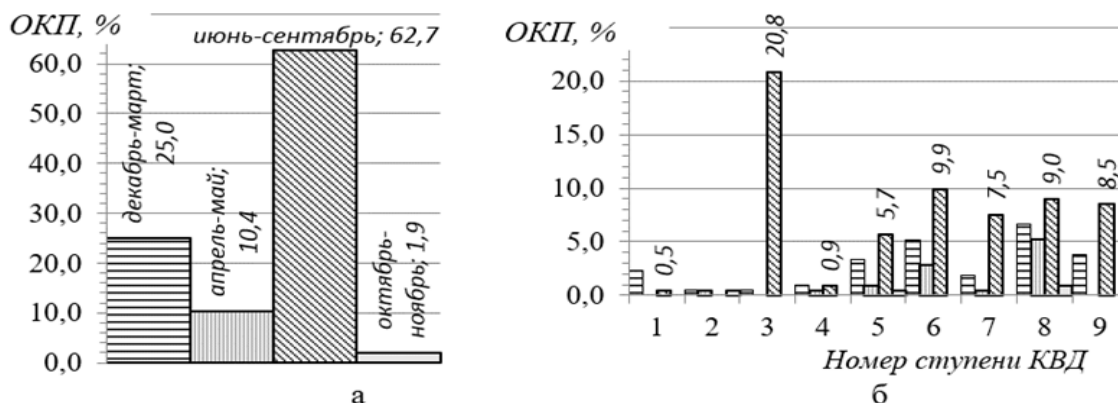


Рис. 13. Повреждаемость рабочих лопаток компрессора по узлу в целом (а) и ступеням (б) в зависимости от времени года для двигателя типа 2

Fig. 13. Fault probability of compressor blades in the whole unit (a) and on stages (б) depending on season time for type 2 engine

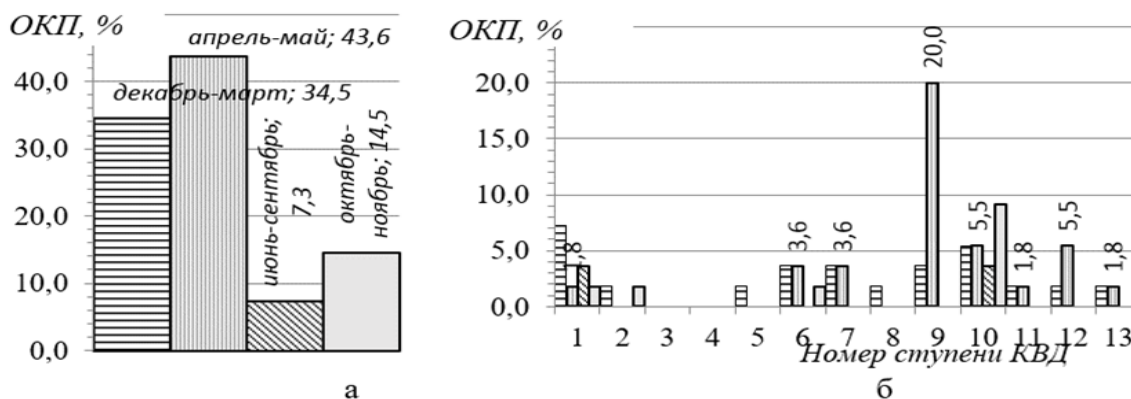


Рис. 14. Повреждаемость рабочих лопаток компрессора по узлу в целом (а) и ступеням (б) в зависимости от времени года для двигателя типа 3

Fig. 14. Fault probability of compressor blades in the whole unit (a) and on stages (б) depending on a season time for type 3 engine

В зимнее время чаще обнаруживаются повреждения, характерные при попадании льда с плохо убранной ВПП (двигатель типа 1 особенно подвержен этим повреждениям из-за конструктивных особенностей – 86,9 % случаев в декабре – марте). Увеличение количества повреждений в августе – сентябре (двигатель типа 2 – 62,7 % случаев) и в апреле (двигатель типа 3 – 43,6 % случаев) может быть связано с сезонной миграцией птиц. Эти выводы подтверждаются анализом сезонного распределения повреждений по ступеням.

Увеличение количества вмятин и забоин на первой ступени двигателя типа 1 указывает на попадание льда. Увеличение повреждений дальних ступеней двигателей типа 2 и типа 3 в весенне-летний период характерно для случаев попадания птиц.

На основании результатов, полученных по представленному выше алгоритму, могут быть разработаны рекомендации к организации оптико-визуального контроля компрессоров ТРДД различных типов (см. п. 6 заключения).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполненный анализ статистической информации о повреждениях элементов проточной части компрессоров двигателей показывает, что основной причиной таких повреждений являются механические соударения с посторонними предметами.

2. Чаще других на лопатках компрессора двигателей образуются забоины. Забоины – одно из характерных повреждений при попадании в двигатель посторонних предметов, часто кусков льда. Эти повреждения в основном обнаруживаются на первых ступенях компрессора. Для дальних ступеней более характерны отгибы уголка, искривления, вмятины, которые получены от таких посторонних предметов, как камни, птицы и т. п.

3. Чаще встречаются повреждения небольших размеров (глубиной 0,1÷0,3 мм, длиной до 10 мм). Однако у двигателя типа 3 наиболее часто, в 34 % случаев, встречались повреждения глубиной порядка 1 мм.

4. Большинство повреждений обнаружено на входной кромке лопаток. Расстояние места повреждения от торца лопатки обычно не превышает 15 мм.

5. В зимнее время чаще наблюдаются повреждения, характерные при попадании льда. Увеличение количества повреждений в августе – сентябре и в апреле связано с сезонной миграцией птиц.

6. Рекомендации для эксплуатирующих организаций по выявлению повреждений при оптико-визуальном контроле компрессоров двигателей сводятся к следующему:

- для двигателя типа 1 – обратить повышенное внимание на ступени 1, 9, 13 и 14 в зоне входной кромки на расстоянии до 10 мм от торца лопаток;

- для двигателя типа 2 – обратить повышенное внимание на ступени 3, 5, 8 и 9 в зоне входной кромки на расстоянии до 15 мм от торца лопаток;

- для двигателя типа 3 – обратить повышенное внимание на ступени 1, 6, 9 и 10 в зоне входной и выходной кромок на расстоянии 10 мм от торца лопаток.

Авторы готовы рассмотреть предложения о разработке автоматизированной системы анализа повреждаемости рабочих лопаток для условий конкретного предприятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Комов А.А.** Влияние компоновки силовой установки самолета на вихреобразование // Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества: сборник тезисов докладов участников Международной научно-технической конференции, посвященной 45-летию Университета 18–20 мая 2016 года. М.: МГТУ ГА, 2016. С. 38.

2. **Чичков Б.А.** Экспериментально-теоретическое исследование спектров собственных частот и форм колебаний новых, поврежденных и восстановленных рабочих лопаток компрессоров // Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества: сборник тезисов докладов участников Международной научно-технической конференции, посвященной 45-летию Университета 18–20 мая 2016 года. М.: МГТУ ГА, 2016. С. 42.

3. **Комов А.А., Белоусов Г.Г.** Основные закономерности повреждения лопаток компрессоров авиационных ГТД посторонними предметами // Научный Вестник МГТУ ГА. 2008. № 134. С. 25–35.

4. **Чичков Б.А.** Исследование повреждаемости проточных частей ТРДД // Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества: сборник тезисов докладов участников Международной научно-технической конференции, посвященной 45-летию Университета 18–20 мая 2016 года. М.: МГТУ ГА, 2016. С. 39.

5. **Чичков Б.А.** Рабочие лопатки авиационных ГТД. Эксплуатационная повреждаемость рабочих лопаток. М.: МГТУ ГА, 2000. 60 с.

6. **Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П.** Введение в системный анализ: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 1989. 367 с.

7. **Ефимова М.Р., Рябцев В.М.** Общая теория статистики. М.: Финансы и статистика, 1991. 304 с.

8. **Химмельблау Д.** Анализ процессов статистическими методами: Пер. с англ. М.: Мир, 1973. 959 с.

9. Шулекин В.Т., Лазарев Е.А. Оценка влияния повреждений рабочих и направляющих лопаток компрессора на эффективность функционирования авиадвигателей // Научный Вестник МГТУ ГА. 2005. № 85. С. 51–56.

10. Блаттнер П. Использование Microsoft Office Excel 2003. Специальное издание: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. 864 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Заяц Михаил Алексеевич, магистрант МГТУ ГА, zayatsmihail@rambler.ru.

STATISTICAL ANALYSIS OF DAMAGEABILITY OF THE BYPASS ENGINES COMPRESSOR BLADES

Boris A. Chichkov¹, Mikhail A. Zaiats¹

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

ABSTRACT

Aircraft gas turbine engines during the operation are exposed to damage of flowing parts. The elements of the engine design, appreciably determining operational characteristics are rotor blades. Character of typical damages for various types of engines depends on appointment and a geographical place of the aircraft operation on which one or another engine is installed. For example, the greatest problem for turboshaft engines operated in the dusty air conditions is erosive wear of a rotor blade airfoil. Among principal causes of flowing parts damages of bypass engine compressors are foreign object damages. Independently there are the damages caused by fatigue of a rotor blade material at dangerous blade mode. Pieces of the ice formed in the input unit, birds and the like can also be a source of danger. The foreign objects getting into the engine from runway are nuts, bolts, pieces of tire protectors, lock-wire, elements from earlier flying off aircraft, etc. The entry of foreign objects into the engine depends on both an operation mode (during the operation on the ground, on takeoff, on landing roll using the reverse and so on), and the aircraft engine position.

Thus the foreign objects entered into the flowing path of bypass engine damage blade cascade of low and high pressure. Foreign objects entered into the flowing part of the engine with rotor blades result in dents on edges and blade shroud, deformations of edges, breakage, camber of peripheral parts and are distributed "nonlinear" on path length (steps). The article presents the results of the statistical analysis of three types engine compressors damageability over the period of more than three years. Damages are divided according to types of engines in whole and to their separate steps, depths and lengths, blades damage location. The results of the analysis make it possible to develop recommendations to carry out the optical-visual control procedures.

Key words: aircraft engine, statistical analysis, compressor, optical-visual control, rotor blades, flowing part, damages.

REFERENCES

1. **Komov A.A.** *Vliyaniye komponovki silovoi ustanovki samoleta na vikhreobrazovanie* [Influence of an aircraft power-plant configuration on vortex formation]. *Grazhdanskaya aviatsiya na sovremennom etape razvitiya nauki, tekhniki i obshchestva*. [Civil Aviation on the modern stage of developing science, engineering and society]. *Sbornik tezisev dokladov uchastnikov Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, posvyashchennoi 45-letiyu Universiteta 18–20 maya 2016 goda*. [Participants' collection of theses of the International scientific and technical conference dedicated to the 45th anniversary of the University, May 18–20, 2016], M., MGTU GA, 2016, p. 38. (in Russian)

2. **Chichkov B.A.** *Eksperimental'no-teoreticheskoe issledovanie spektrov sobstvennykh chastot i form kolebaniy novykh, povrezhdennykh i vosstanovlennykh rabochnik lopatok kompressorov* [Experimentally theoretical probe of spectra of fundamental frequencies and oscillation shapes of new, dam-

aged and restored compressor blades]. *Grazhdanskaya aviatsiya na sovremennom etape razvitiya nauki, tekhniki i obshchestva* [Civil Aviation on the modern stage of developing science, engineering and society]. *Sbornik tezisev dokladov uchastnikov Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, posvyashchennoi 45-letiyu Universiteta 18–20 maya 2016 goda*. [Participants' collection of theses of the International scientific and technical conference dedicated to the 45th anniversary of the University, May 18–20, 2016], M., MGTU GA, 2016, p. 42. (in Russian)

3. Komov A.A., Belousov G.G. *Osnovnye zakonomernosti povrezhdeniya lopatok kompressorov aviatsionnykh GTD postoronnimi predmetami* [Basic laws of the compressor blades damage of aviation gas turbine engine with the foreign object from outside matter]. *Nauchny Vestnik MGTU GA* [Scientific Bulletin of MSTUCA], 2008, No. 134, pp. 25–35. (in Russian)

4. Chichkov B.A. *Issledovanie povrezhdaemosti protochnykh chastei TRDD* [Probe of damageability of flowing parts of bypass engines]. *Grazhdanskaya aviatsiya na sovremennom etape razvitiya nauki, tekhniki i obshchestva* [Civil Aviation on the modern stage of developing science, engineering and society]. *Sbornik tezisev dokladov uchastnikov Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, posvyashchennoi 45-letiyu Universiteta 18–20 maya 2016 goda* [Participants' collection of theses of the International scientific and technical conference dedicated to the 45th anniversary of the University, May 18–20, 2016], M., MGTU GA, 2016, p. 39. (in Russian)

5. Chichkov B.A. *Rabochie lopatki aviatsionnykh GTD. Ekspluatatsionnaya povrezhdaemost' rabochikh lopatok* [Gas turbine engine blades. Operation damageability of blades]. M., MGTU GA, 2000, 60 p. (in Russian)

6. Peregudov F.I., Tarasenko F.P. *Vvedenie v sistemnyi analiz* [Introduction into the system analysis]. Tutorial for universities. M., Vyssh. shk., 1989, 367 p. (in Russian)

7. Efimova M.R., Ryabtsev V.M. *Obshchaya teoriya statistiki* [The general theory of statistics]. M., *Finansy i statistika* [Finance and statistics], 1991, 304 p. (in Russian)

8. Khimmel'blau D. *Analiz protsessov statisticheskimi metodami* [Process analysis by statistical methods]. Translation from English. M., Mir, 1973, 959 p. (in Russian)

9. Shulekin V.T., Lazarev E.A. *Otsenka vliyaniya povrezhdenii rabochikh i napravlyayushchikh lopatok kompressora na effektivnost' funktsionirovaniya aviadvigatelei* [The assessment of operative working and directing blades damages influence on turbo-jet engine operation effectiveness]. *Nauchny Vestnik MGTU GA* [Scientific Bulletin of MSTUCA], 2005, No. 85, pp. 51–56. (in Russian)

10. Blattner P. *Ispol'zovanie Microsoft Office Excel 2003* [Use of Microsoft Office Excel 2003]. Special edition. M., *Izdatel'skii dom "Vil'yamc"*, 2005, 864 p. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Boris A. Chichkov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Full Professor of Aircraft Engines Chair, MSTUCA, b.chichkov@mstuca.aero.

Mikhail A. Zajats, Graduate Student, MSTUCA, zayatsmihail@rambler.ru.

Поступила в редакцию
Принята в печать

09.10.2017
28.12.2017

Received
Accepted for publication

09.10.2017
28.12.2017