

УДК 629.7.035

doi: 10.18698/0536-1044-2019-10-94-102

Методика определения живучести и стойкости воздушных винтов летательных аппаратов к ударному воздействию посторонних предметов

Е.В. Нескоромный, Д.С. Марков

ФГК ВОО ВПО Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

Methodology for Determining the Survivability and Resistance of Aircraft Propellers to the Impact of Foreign Objects

E.V. Neskoromnyy, D.S. Markov

Engineering Training and Research Air Force Center — Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin

Предложена методика, позволяющая на основании данных о компоновке и конструкции летательного аппарата и его силовой установки с воздушным винтом с помощью комплекса математических моделей и экспериментальных установок определить живучесть и стойкость лопастей к ударному воздействию посторонними предметами, находящимися на поверхности аэродромного покрытия. Рассмотрен пример применения методики для малоразмерного летательного аппарата с силовой установкой, оснащенной толкающим винтом. Приведены результаты теоретических исследований по определению границ попадания и параметров соударения посторонних предметов с воздушным винтом. На основе полученных данных проведены экспериментальные исследования по определению повреждаемости частицами гранита лопастей, выполненных из композиционных материалов. Определено предельное значение относительной массы частицы гранита, которое обеспечивает работоспособность воздушного винта во время и после ударного воздействия. Даны рекомендации по повышению ударостойкости лопастей.

Ключевые слова: лопасть из композиционных материалов, повреждения посторонними предметами, воздушный винт, живучесть и стойкость ударному воздействию, ударостойкость

The authors propose a technique for determining the survivability and resistance of the blades to impact by foreign objects located on the surface of the airfield pavement, using a set of mathematical models and experimental plants and considering the data on the layout and design of the aircraft and its propulsion system with a propeller. An example of the technique's application to a small-sized aircraft with a propulsion system with a pushing propeller is considered. The results of theoretical studies on determining the boundaries and parameters of the impact of foreign objects with the propeller are presented. Based on the data obtained, experimental studies are conducted to determine damage to the blades made of composite materials by granite particles. The limiting value of the relative mass of a granite particle, which ensures the operability of the propeller during and after the impact is determined. Recommendations on increasing the impact resistance of the blades are given.

Keywords: blade made of composite materials, damage by foreign objects, propeller, survivability and impact resistance, impact resistance

Анализ статистических данных эксплуатации летательных аппаратов (ЛА) с турбовинтовыми двигателями показывает, что для такой техники проблема досрочного съема воздушных винтов (ВВ) по причине повреждения посторонними предметами (ПП) является актуальной [1, 2].

Изучению вопроса повреждения ПП элементов газотурбинных двигателей (ГТД) посвящено большое количество экспериментальных и теоретических работ, в частности [1, 3–5]. Для ВВ проблема повреждения ПП не так ярко выражена, как для лопаток ГТД. Объясняется это тем, что размеры лопастей ВВ значительно превосходят размеры рабочих лопаток компрессора, поэтому нормы допустимых повреждений различаются в несколько раз, а номенклатура ПП, встречающихся на поверхности аэродрома, одинакова для всех типов силовых установок (СУ).

Повреждение, как правило, вызвано ПП, находящимися на поверхности взлетно-посадочной полосы, рулежных дорожек и местах стоянки самолетов. ПП образуются при разрушении искусственных покрытий аэродромов, заносом с грунтовых обочин ветром, газовыми струями двигателей ЛА, колесами средств наземного обслуживания и т. п. Такие ПП способны попасть в двигатель следующими путями:

- из-под колес шасси на всех этапах полета;
- вихревым засасыванием ПП в ВВ при работе у земли;
- забросом реактивными струями при взлете парой или проруливании мест стоянки ЛА;
- при использовании реверса тяги на пробеге самолета после посадки.

Кроме того, на вход в СУ могут попасть следующие ПП: элементы крепления и конструкции самолета и СУ из-за недостаточной надежности и низкой эксплуатационной технологичности, куски льда с обледеневших элементов планера или СУ при отказе или нарушении правил эксплуатации противообледенительной системы (ПОС), а также с поверхности аэродрома при некачественной подготовке к полетам, прежде всего в зимний период эксплуатации.

В связи с развитием малой авиации, для которой размеры лопастей ВВ сопоставимы с размерами рабочих лопаток компрессора низкого давления ГТД большой степени двухконтурности, проблема повреждения ПП становится достаточно острой. Причем в конструкции таких лопастей широко применяют полимерные композиционные материалы (ПКМ), ха-

рактеризуемые большей повреждаемостью ПП по сравнению с металлическими лопатками ГТД при прочих равных условиях.

Для ЛА с толкающим ВВ дополнительной причиной повреждения лопастей является выброс ПП из-под колес основных стоек шасси.

Цель работы — разработка методики, позволяющей на основании данных о компоновке ЛА и его СУ с ВВ, о конструкции устройств защиты и степени засоренности аэродромного покрытия определить способность ВВ выполнять свои функции во время и после ударного воздействия посторонних предметов.

Предлагается методика, которая применима как для проектируемых ЛА, так и для ЛА, находящихся в эксплуатации. На примере малоразмерного ЛА показано влияние конструктивных параметров и компоновки ЛА и СУ с ВВ на повреждаемость ПП.

Постановка задачи. Требуется определить предельное значение относительной массы ПП, которое обеспечивает работоспособность ВВ во время и после ударного воздействия ПП.

В качестве объекта исследования выбран двухлопастной ВВ с лопастями из ПКМ в составе СУ малоразмерного ЛА с поршневым двигателем. Перо лопасти имеет монококовую конструкцию, представляющую собой тонкостенную оболочку, образующую аэродинамический профиль. Полость внутри оболочки заполнена пенопластом.

Содержание методики. Анализ работ по оценке защищенности ВВ от воздействия ПП [6–8] выявил, что в них не были учтены некоторые особенности компоновки ЛА и внешних условий, воздействующих на процесс выброса ПП из-под основных колес шасси.

Предлагаемая методика (рис. 1) включает в себя три основных этапа:

- выбор исходных данных;
- математическое моделирование;
- экспериментальные исследования.

Этап выбора исходных данных. На первом этапе в качестве исходных данных заданы геометрические параметры ЛА и его СУ, режимы работы СУ на различных этапах полета и характеристики ПП.

Основные параметры ВВ: тип винта — толкающий; количество лопастей — 2 шт.; диаметр винта — 1900 мм. Режим работы СУ: частота вращения на взлете — 2390 мин⁻¹ (отрыв), при

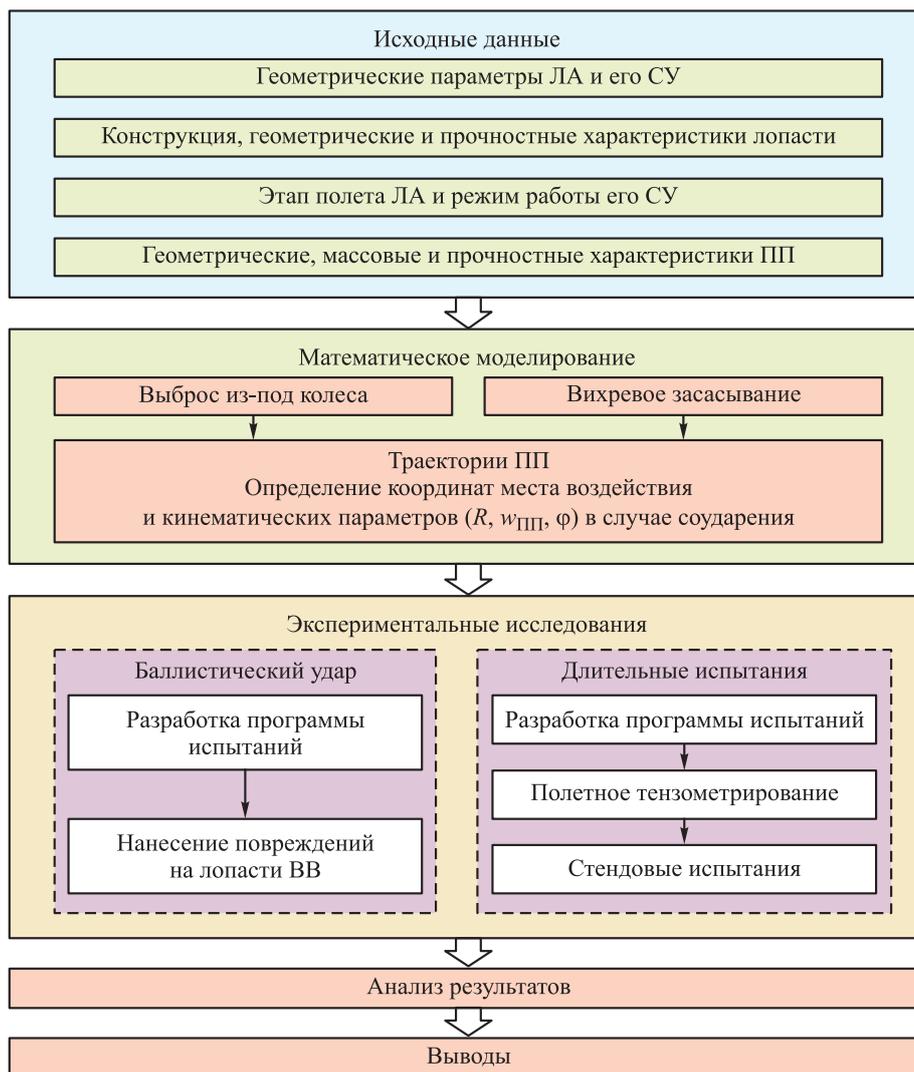


Рис. 1. Схема методики определения защищенности ВВ ЛА от повреждения ПП

посадке — 1200 мин^{-1} . Взлетная скорость движения ЛА — 70 км/ч ; посадочная скорость ЛА — 110 км/ч .

Характеристики ПП (тип, масса и размер), появляющихся на поверхности аэродрома, взяты из работы [2]. Так, наиболее распространенными на поверхности аэродрома являются частицы гранитного щебня массой от $0,05$ до $7,00 \text{ г}$. Поэтому расчетные и экспериментальные исследования проведены для посторонних предметов — частиц гранитного щебня.

Этап математического моделирования. Математическое моделирование процесса попадания ПП на вход в СУ с ВВ выполнено для двух случаев:

- выброса ПП из-под колеса шасси;
- вихревого засасывания.

Остальные пути (такие как заброс ПП при использовании реверса и заброс реактивными

струями впереди руляющих самолетов при взлете парой) являются неактуальными для рассматриваемого типа ЛА.

Для определения кинематических параметров и зон возможных соударений ПП с лопастями ВВ при вихревом засасывании использован ряд известных методик и подходов, связанных с расчетом течения газа, индуцируемого СУ [9], с движением ПП в газовом потоке со статистической оценкой параметров и характеристик ПП [10], с исследованием процесса вихреобразования [9, 10]. Постановка задачи, начальные условия и результаты исследования вихревого засасывания приведены в публикациях [11, 12].

Следует отметить, что в ранних работах, посвященных исследованию процесса вихреобразования [9, 10], ключевое место отведено моделированию приземного вихря с помощью ме-

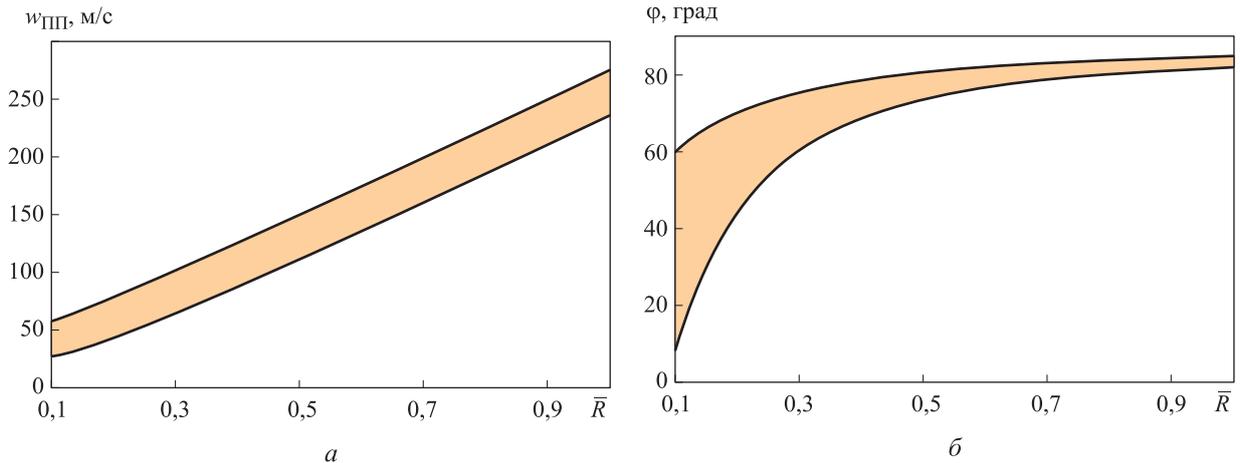


Рис. 2. Зависимости относительной скорости ПП $w_{ПП}$ (а) и угла ϕ (б) от относительного радиуса \bar{R} лопасти

тогда дискретных вихрей. В предложенной методике использован метод моделирования с помощью решения осредненных уравнений Навье — Стокса.

На рис. 2, а и б приведены зависимости кинематических параметров соударения ПП с лопастью для случая вихревого засасывания ПП на вход в ВВ от относительного радиуса лопасти \bar{R} , где $w_{ПП}$ — относительная скорость соударения ПП с лопастью (далее относительная скорость ПП); ϕ — угол между перпендикуляром к плоскости вращения винта и вектором $w_{ПП}$ относительной скорости ПП.

Задача о попадании ПП, выброшенных из-под колеса шасси ЛА, решена с учетом движения ЛА, а также сил сопротивления воздуха и тяжести, действующих на ПП, при следующих допущениях: ПП не взаимодействуют друг с другом; выброс ПП из-под колеса происходит только под действием центробежных сил; ПП, попавшие в фюзеляж, из дальнейших исследований исключаются.

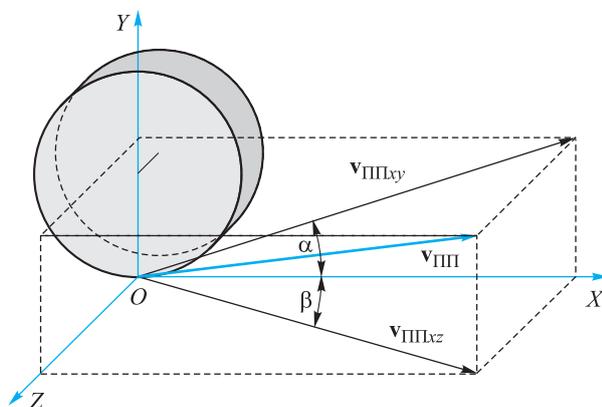


Рис. 3. Расчетная схема выброса ПП из-под колеса шасси ЛА

Следует отметить, что выброс ПП из-под колеса шасси рассмотрен для колес передней опоры и основных стоек шасси. В методиках [13, 14] выброс из-под основных колес не рассматривался ввиду того, что основные стойки шасси исследуемых ЛА находились за СУ.

На основе опыта проведения экспериментальных исследований по выбросу ПП из-под колес шасси, опубликованных в работах [7, 14], сформирована расчетная схема, приведенная на рис. 3. В указанных экспериментах определялись значения вектора абсолютной скорости выброса ПП $v_{ПП}$ и углы выброса α в продольной (ХОУ) и β поперечной (ХОZ) плоскостях. Далее вычислялись значения проекций вектора $v_{ПП}$ в продольном $v_{ППxy}$ и поперечном $v_{ППxz}$ направлениях. Использование данной схемы позволяет определить сочетания параметров $v_{ПП}$, α и β , при которых возможно попадание ПП в воздушный винт.

Результатом расчетов являются траектории ПП и места соударения с лопастью ВВ. Наиболее опасными с точки зрения повреждения являются концевые сечения лопасти, так как в них скорость соударения максимальна. Корневые сечения в меньшей степени подвержены повреждению из-за экранирования их фюзеляжем и воздухозаборником системы охлаждения двигателя ЛА.

Границы попадания ПП из-под носовой и основных стоек шасси ЛА в окружность, описываемую винтом, приведены на рис. 4, а и б соответственно.

Полученные зависимости являются исходными данными для проведения третьего этапа — экспериментальных исследований по определению защищенности лопастей ВВ.

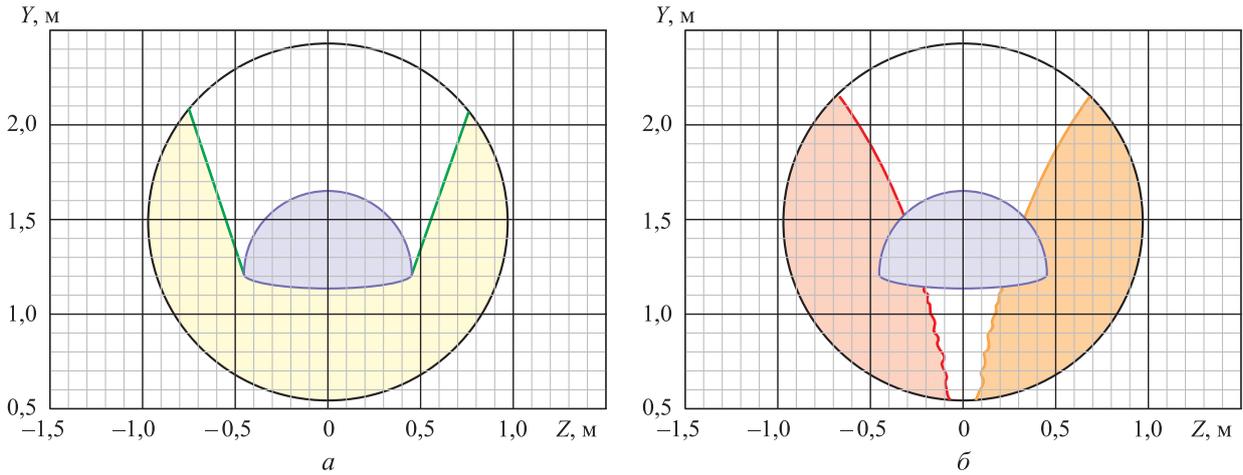


Рис. 4. Границы попадания ПП из-под носовой (а) стойки и основных (б) стоек шасси ЛА в окружность, описываемую винтом:

— — винт; — — граница разброса ПП; — — фюзеляж; — — правая граница заброса ПП; — — левая граница заброса ПП

Этап экспериментальных исследований. Экспериментальные исследования выполнены на баллистическом стенде, состав, конструкция и принцип работы которого описаны в работе [15].

По результатам теоретических исследований процесса заброса ПП вихревым засасыванием и колесами шасси разработана программа испытаний, предусматривающая нанесение по пять повреждений на две лопасти по заданной схеме. Схема лопасти из ПКМ с указанием необходимых геометрических параметров и точки прицеливания приведена на рис. 5.

Процесс повреждения фиксировался с помощью цифровой высокоскоростной видеокамеры Fastec TS3. Скорость видеосъемки составляла от 15 000 до 20 000 кадров/с в зависимости от скорости соударения.

Параметром, определяющим выполнение требований живучести и стойкости лопастей воздушных винтов ЛА к ударному воздействию

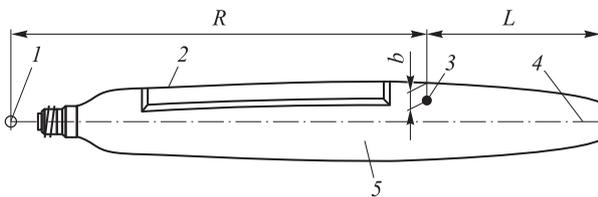


Рис. 5. Схема лопасти из ПКМ для проведения испытаний:

1 — ось вращения; 2 — передняя кромка; 3 — точка прицеливания; 4 — ось коэля; 5 — рабочая поверхность; R — расстояние от оси вращения до точки прицеливания; L — расстояние от концевое сечения лопасти до точки прицеливания; b — расстояние от передней кромки лопасти до точки прицеливания

посторонних предметов, является относительная масса ПП:

$$\bar{m}_{ПП} = \frac{m_{ППэксп}}{m_{ППдоп}}$$

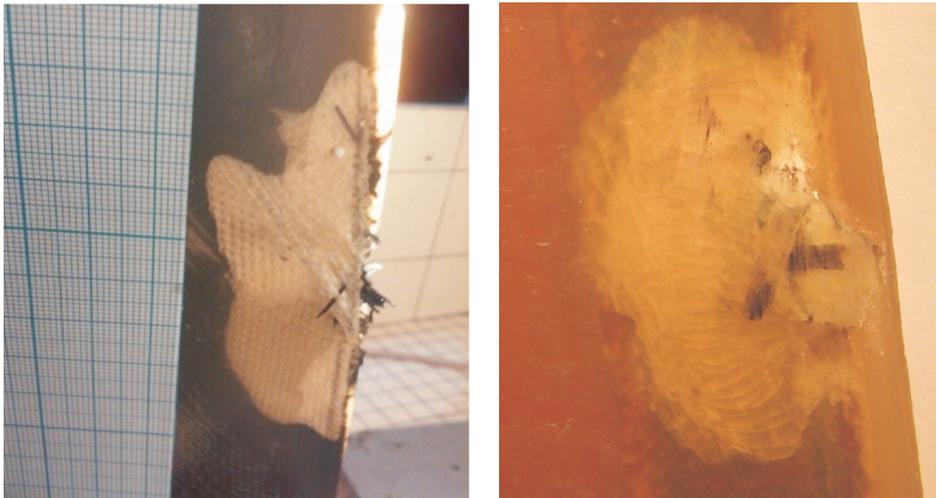
где $m_{ППэксп}$ — масса ПП, используемого в эксперименте; $m_{ППдоп}$ — допустимая масса постороннего предмета (задаваемая на основании требований к стойкости лопастей ВВ к воздействию ПП), при попадании которого СУ должна сохранять работоспособное состояние. Критерием выполнения указанных требований является неравенство $\bar{m}_{ПП} \geq 1$.

Результаты исследований. Повреждения передней кромки лопасти гранитным щебнем (гранитным ПП), полученные экспериментальным путем и в процессе эксплуатации, при $\bar{m}_{ПП} = 1,00$ и $w_{ПП} = 176$ м/с приведены на рис. 6, а, а при $\bar{m}_{ПП} = 0,14$ и $w_{ПП} = 190$ м/с — на рис. 6, б.

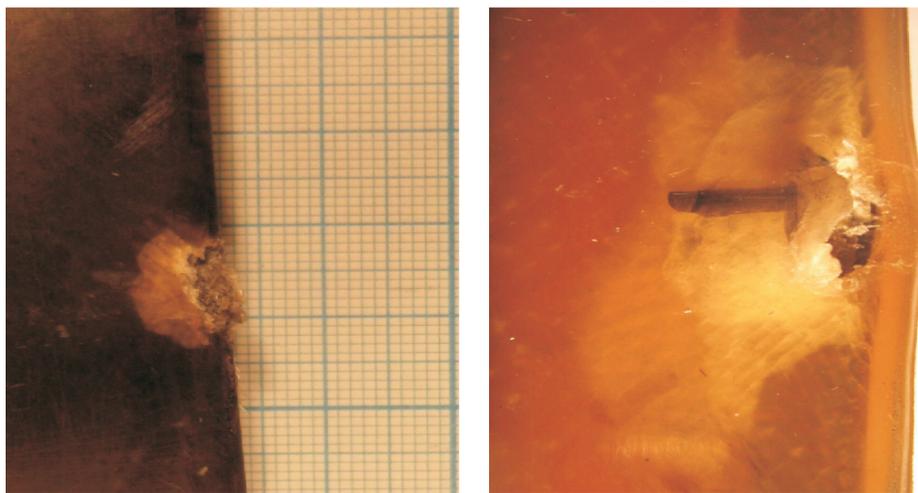
Повреждения лопасти в месте размещения нагревательных элементов ПОС, полученные в результате соударения с гранитным ПП при $\bar{m}_{ПП} = 0,2$ и $w_{ПП} = 155$ м/с, показаны на рис. 7.

На рис. 8, а и б показаны экспериментальные и эксплуатационные повреждения периферии лопасти в районе передней кромки, нанесенные гранитным ПП при $\bar{m}_{ПП} = 1$ и $w_{ПП} = 230$ м/с.

Приведенные результаты являются исходными данными для выполнения второго этапа исследований — определения остаточной долговечности поврежденных лопастей в стендовых условиях при нагружении их динамическими нагрузками по симметричному циклу.



а



б

Рис. 6. Экспериментальные (слева) и эксплуатационные (справа) повреждения передней кромки лопасти, нанесенные гранитным ПП при различных параметрах ПП:

а — $\bar{m}_{\text{ПП}} = 1,0$, $w_{\text{ПП}} = 176$ м/с; б — $\bar{m}_{\text{ПП}} = 0,14$, $w_{\text{ПП}} = 190$ м/с



Рис. 7. Повреждения нагревательных элементов ПОС лопасти, полученные в результате соударения с ПП при массе

$\bar{m}_{\text{ПП}} = 0,2$ и $w_{\text{ПП}} = 155$ м/с



Рис. 8. Экспериментальные (а) и эксплуатационные (б) повреждения периферии лопасти в районе передней кромки, нанесенные гранитным ПП при $\bar{m}_{ПП} = 1,0$ и $w_{ПП} = 230$ м/с

Выводы

1. В результате исследований определены границы попадания и параметры соударения ПП с лопастями ВВ. На основе полученных данных проведены экспериментальные исследования по определению повреждаемости частицами гранита лопастей. Предельное значение относительной массы ПП, обеспечивающее работоспособность исследуемого ВВ во время и после ударного воздействия ПП, составляет $\bar{m}_{ПП} = 0,2$. Требование к живучести стойкости лопастей ВВ к воздействию ПП $\bar{m}_{ПП} \geq 1$ не выполняется.

2. Добиться выполнения этого требования можно изменением компоновки ЛА и его СУ или увеличением ударостойкости лопастей, например, путем установки металлических защитных накладок на передней кромке.

Результаты экспериментальных исследований:

– повреждения лопастей, нанесенные в лабораторных условиях, соответствуют эксплуатационным;

– повреждения передней кромки, возникшие при столкновении с гранитным ПП массой $\bar{m}_{ПП} > 0,2$ выше области размещения полиуретановой защитной накладки с ПОС, приводят к разрушению оболочки из ПКМ на всю глубину (протяженностью до 30 % хорды); такие повреждения носят недопустимый характер;

– повреждения передней кромки лопасти, полученные при взаимодействии с гранитным ПП массой $\bar{m}_{ПП} = 1,0$ в месте размещения нагревательных элементов ПОС, сопровождаются их разрушением и, соответственно, отказом системы;

– повреждения со стороны корыта в сечениях выше $0,8 \bar{R}$ лопасти не приводят к разрушению связующего ПКМ на всю глубину оболочки, так как удар направлен под острым углом; повреждается только верхний слой ПКМ;

– повреждения со стороны корыта в сечениях ниже $0,8 \bar{R}$ лопасти сопровождаются разрушениями связующего ПКМ на всю глубину оболочки.

Литература

- [1] Богданов М.А., Горский А.Н., Нескоромный Е.В., Потоцкий М.В. Подход к определению повреждения посторонними предметами лопастей винтов и винтовентиляторов силовых установок военно-транспортных самолетов с учетом центробежных и газовых сил. *Перспективы развития авиационных комплексов. Тр. ВВИА им. Н.Е. Жуковского*, Москва, ВВИА, 2008, с. 122–138.
- [2] Евдокимов А.И., Новицкий С.М., Попов В.А. Характеристики посторонних предметов, появляющихся на аэродромных покрытиях в процессе эксплуатации. *Научно-*

- методические материалы по конструкции и системам управления ГТД. Тр. ВВИА им. Н.Е. Жуковского, Москва, ВВИА, 1995, с. 85–92.*
- [3] Богданов М.А., Горский А.Н., Круглов В.В., Нескоромный Е.В., Потоцкий М.В., Четвердин М.Ю. Применение технических средств волоконно-оптических линий связи для определения истинных деформаций в волокнистых полимерных композиционных материалах, применяемых в самолетостроении. *Перспективы развития авиационных комплексов. Тр. ВВИА им. Н.Е. Жуковского, Москва, ВВИА, 2008, с. 116–121.*
- [4] Горский А.Н., Евдокимов А.И. Исследование ударного взаимодействия лопастей ЛБВ1 воздушного винта АВ-140 с посторонними предметами. *Научно-методические материалы по конструкции и системам управления ГТД. Тр. ВВИА им. Н.Е. Жуковского, Москва, ВВИА, 2007, с. 24–33.*
- [5] Шубин И.А., Богданов М.А., Горский А.Н. Расчетные исследования параметров взаимодействия посторонних предметов с лопастями винтовентиляторов. *Научно-методические материалы по конструкции и системам управления ГТД. Тр. ВВИА им. Н.Е. Жуковского, Москва, ВВИА, 2004, с. 3–11.*
- [6] Евдокимов А.И., Горский А.Н., Максимов Ю.Е. Расчет движения посторонних предметов на входе в силовую установку с ТВД. *Научно-методические материалы по конструкции и системам управления ГТД. Тр. ВВИА им. Н.Е. Жуковского, Москва, ВВИА, 2001, с. 12–17.*
- [7] Федорко Г.В. Основные положения методики расчета траекторий движения посторонних предметов при их выбросе из-под колеса. *Научно-методические материалы по конструкции и системам управления ГТД. Тр. ВВИА им. Н.Е. Жуковского, Москва, ВВИА, 1994, с. 28–33.*
- [8] Евдокимов А.И., Горский А.Н., Максимов Ю.Е. Расчет движения посторонних предметов на входе в силовую установку с ТВД. *Научно-методические материалы по конструкции и системам управления ГТД. Труды ВВИА им. Н.Е. Жуковского, Москва, ВВИА, 2001, с. 15–24.*
- [9] Алексеев В.Б., Ботин С.В., Евдокимов А.И., Комов А.А., Карапетян А.К. Исследование путей снижения интенсивности вихревого течения перед воздухозаборником ГТД. *Научно-методические материалы по конструкции и системам управления ГТД. Тр. ВВИА им. Н.Е. Жуковского, Москва, ВВИА, 1989, с. 89–96.*
- [10] Полуяхтов В.А., Шубин И.А. Определение параметров воздушного потока, индуцируемого изолированным одиночным и соосным воздушными винтами. *Научно-методические материалы по конструкции и системам управления ГТД. Тр. ВВИА им. Н.Е. Жуковского, Москва, ВВИА, 2000, с. 144–151.*
- [11] Евдокимов А.И., Нескоромный Е.В., Мухамедьяров Р.Р. Численное моделирование нестационарного процесса вихреобразования воздушным винтом легкого летательного аппарата. *Насосы. Турбины. Системы, 2017, № 4(21), с. 45–52.*
- [12] Нескоромный Е.В., Евдокимов А.И., Мухамедьяров Р.Р. Расчетное исследование процесса вихреобразования воздушным винтом легкого летательного аппарата. *Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского. Сб. докл. XIV Всерос. науч.-техн. конф., Москва, 13–14 апреля 2017, Москва, эл. издание, 2017, с. 67–75.*
- [13] Комов А.А. *Исследование процесса разлета посторонних предметов из-под колес шасси с целью обеспечения защищенности авиационных двигателей.* Научно-технический отчет № 261-83-111, 1983.
- [14] Комов А.А. Некоторые вопросы предотвращения попадания посторонних предметов с аэродромных покрытий. *Научно-методические материалы по конструкции и системам управления ГТД. Тр. ВВИА им. Н.Е. Жуковского, Москва, ВВИА, 2001, с. 56–63.*
- [15] Евдокимов А.И., Нескоромный Е.В., Марков Д.С. Экспериментальная установка для проведения специальных испытаний по оценке повреждаемости элементов авиационных силовых установок посторонними предметами. *Насосы. Турбины. Системы, 2017, № 4(25), с. 35–42.*

References

- [1] Bogdanov M.A., Gorskiy A.N., Neskromnyy E.V., Pototskiy M.V. The approach to the determination of damage by foreign objects of the blades of propellers and fan motors of power plants of military transport aircraft, taking into account centrifugal and gas forces. *Perspektivy razvitiya aviatsionnykh kompleksov. Trudy VVIA im. N.E. Zhukovskogo* [Prospects for the development of aviation systems. Proceedings of VVIA named after N.E. Zhukovsky]. Moscow, VVIA publ., 2008, pp. 122–138 (in Russ.).
- [2] Evdokimov A.I., Novitskiy S.M., Popov V.A. Characteristics of foreign objects appearing on the airfield surfaces during operation. *Nauchno-metodicheskie materialy po konstruksii i sistemam upravleniya GTD. Trudy VVIA im. N.E. Zhukovskogo* [Scientific and methodological materials on the design and control systems of gas turbine engines. Proceedings of VVIA named after N.E. Zhukovsky]. Moscow, VVIA publ., 1995, pp. 85–92 (in Russ.).
- [3] Bogdanov M.A., Gorskiy A.N., Kruglov V.V., Neskromnyy E.V., Pototskiy M.V., Chetverdin M.Yu. The use of technical means of fiber-optic communication lines to determine the true deformations in the fibrous polymer composite materials used in aircraft construction. *Perspektivy razvitiya aviatsionnykh kompleksov. Trudy VVIA im. N.E. Zhukovskogo* [Prospects for the development of aviation systems. Proceedings of VVIA named after N.E. Zhukovsky]. Moscow, VVIA publ., 2008, pp. 116–121 (in Russ.).
- [4] Gorskiy A.N. Investigation of the impact interaction of AB-140 propeller blades with foreign objects. *Nauchno-metodicheskie materialy po konstruksii i sistemam upravleniya GTD. Trudy VVIA im. N.E. Zhukovskogo* [Scientific and methodological materials on the design and control systems of gas turbine engines. Proceedings of VVIA named after N.E. Zhukovsky]. Moscow, VVIA publ., 2007, pp. 24–33 (in Russ.).
- [5] Shubin I.A., Bogdanov M.A., Gorskiy A.N. Computational studies of the parameters of the interaction of foreign objects with fan blades. *Nauchno-metodicheskie materialy po konstruksii i sistemam upravleniya GTD. Trudy VVIA im. N.E. Zhukovskogo* [Scientific and methodological materials on the design and control systems of gas turbine engines. Proceedings of VVIA named after N.E. Zhukovsky]. Moscow, VVIA publ., 2004, pp. 3–11 (in Russ.).
- [6] Evdokimov A.I., Gorskiy A.N., Maksimov Yu.E. Calculation of the movement of foreign objects at the entrance to the power plant with a theater. *Nauchno-metodicheskiye materialy po konstruksii i sistemam upravleniya GTD. Trudy VVIA im. N.E. Zhukovskogo* [Scientific and methodological materials on the design and control systems of gas turbine engines. Proceedings of VVIA named after N.E. Zhukovsky]. Moscow, VVIA publ., 2001, pp. 12–17 (in Russ.).
- [7] Fedorko G.V. The main provisions of the methodology for calculating the trajectories of the movement of foreign objects when they are ejected from under the wheel. *Nauchno-metodicheskie materialy po konstruksii i sistemam upravleniya GTD. Trudy VVIA im. N.E. Zhukovskogo* [Scientific and methodological materials on the design and control systems of gas turbine engines. Proceedings of VVIA named after N.E. Zhukovsky]. Moscow, VVIA publ., 1994, pp. 28–33 (in Russ.).
- [8] Evdokimov A.I., Gorskiy A.N., Maksimov Yu.E. Calculation of the movement of foreign objects at the entrance to the power plant with a theater. *Nauchno-metodicheskie materialy po konstruksii i sistemam upravleniya GTD. Trudy VVIA im. N.E. Zhukovskogo* [Scientific and methodological materials on the design and control systems of gas turbine engines. Proceedings of VVIA named after N.E. Zhukovsky]. Moscow, VVIA publ., 2001, pp. 15–24 (in Russ.).
- [9] Alekseev V.B., Botin S.V., Evdokimov A.I., Komov A.A., Karapetyan A.K. Investigation of ways to reduce the intensity of the vortex flow in front of the GTE air intake. *Nauchno-metodicheskie materialy po konstruksii i sistemam upravleniya GTD. Trudy VVIA im. N.E. Zhukovskogo* [Scientific and methodological materials on the design and control systems of gas turbine engines. Proceedings of VVIA named after N.E. Zhukovsky]. Moscow, VVIA publ., 1988, pp. 89–96 (in Russ.).
- [10] Poluyakhtov V.A., Shubin I.A. Determination of airflow parameters induced by insulated single and coaxial propellers. *Nauchno-metodicheskie materialy po konstruksii i sistemam*

- upravleniya GTD. Trudy VVIA im. N.E. Zhukovskogo* [Scientific and methodological materials on the design and control systems of gas turbine engines. Proceedings of VVIA named after N.E. Zhukovsky]. Moscow, VVIA publ., 2000, pp. 144–151 (in Russ.).
- [11] Evdokimov A.I., Neskromnyy E.V., Mukhamed'yarov R.R. Numerical simulation of non-stationary process of vortex formation with a propeller of a light aircraft. *Pumps. Turbines. Systems*, 2017, no. 4(21), pp. 45–52 (in Russ.).
- [12] Neskromnyy E.V., Evdokimov A.I., Mukhamed'yarov R.R. Estimated study of the process of vortex formation with a propeller of a light aircraft. *Nauchnye chteniya po aviatsii, posvyashchennye pamyati N.E. Zhukovskogo. Sb. dokl. XIV Vseross. nauch.-tekhn. konf.* [Scientific readings on aviation dedicated to the memory of N.E. Zhukovsky. Collection of reports XIV All-Russian Scientific and Technical Conference]. Moscow, 13–14 April 2017, Moscow, El. Edition publ., 2017, pp. 67–75 (in Russ.).
- [13] Komov A.A. *Issledovanie protsessa razleta postoronnikh predmetov iz-pod koles shassi s tsel'yu obespecheniya zashchishchennosti aviatsionnykh dvigateley* [The study of the process of dispersion of foreign objects from under the wheels of the chassis in order to ensure the security of aircraft engines]. Scientific and Technical Report no. 261-83-111, 1983.
- [14] Komov A.A. Some issues to prevent the ingress of foreign objects from airfield pavements. *Nauchno-metodicheskie materialy po konstruksii i sistemam upravleniya GTD. Trudy VVIA im. N.E. Zhukovskogo* [Scientific and methodological materials on the design and control systems of gas turbine engines. Proceedings of VVIA named after N.E. Zhukovsky]. Moscow, VVIA publ., 2001, pp. 56–63 (in Russ.).
- [15] Evdokimov A.I., Neskromnyy E.V., Markov D.S. Experimental setup for special tests to assess the damageability of elements of aircraft power plants by foreign objects. *Pumps. Turbines. Systems*, 2017, no. 4(25), pp. 35–42 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 16.04.2019

Информация об авторах

НЕСКОРОМНЫЙ Евгений Вячеславович — кандидат технических наук, докторант кафедры 73. ФГК ВОУ ВПО Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Воронеж, Российская Федерация, ул. Старых Большевиков, 54а, e-mail: neskor80@yandex.ru).

МАРКОВ Данил Сергеевич — адъюнкт кафедры 73. ФГК ВОУ ВПО Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Воронеж, Российская Федерация, ул. Старых Большевиков, 54а, e-mail: d_markov787@mail.ru).

Information about the authors

NESKROMNYY Evgeniy Vyacheslavovich — Candidate of Science (Eng.), Doctoral Candidate, Department 73. Engineering Training and Research Air Force Center — Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin (394064, Voronezh, Russian Federation, Starykh Bolshevikov St., Bldg. 54a, e-mail: neskor80@yandex.ru).

MARKOV Danil Sergeevich — Postgraduate, Department 73. Engineering Training and Research Air Force Center — Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin (394064, Voronezh, Russian Federation, Starykh Bolshevikov St., Bldg. 54a, e-mail: d_markov787@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Нескоромный Е.В., Марков Д.С. Методика определения живучести и стойкости воздушных винтов летательных аппаратов к ударному воздействию посторонних предметов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 10, с. 93–102, doi: 10.18698/0536-1044-2019-10-94-102

Please cite this article in English as:

Neskromnyy E.V., Markov D.S. Methodology for Determining the Survivability and Resistance of Aircraft Propellers to the Impact of Foreign Objects. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 10, pp. 93–102, doi: 10.18698/0536-1044-2019-10-94-102