

## Стендовые испытания по забросу птиц на невращающуюся лопатку вентилятора

Шорр Б.Ф.<sup>1</sup>, Гладкий И.Л.<sup>2</sup>, Мельникова Г.В.<sup>1</sup>, **Петров С.Б.<sup>1</sup>**, Никифоров В.С.<sup>1</sup>, Серебряков Н.Н.<sup>1</sup>, Мацаренко В.С.<sup>1</sup>, Новоселов А.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва

<sup>2</sup> АО «ОДК-Авиадвигатель», Пермь, Россия

e-mail: shorr@ciam.ru

Приведены результаты стендовых испытаний по забросу птиц в сектор вентилятора авиационного двигателя, состоящий из трех невращающихся рабочих лопаток. Испытания проведены на модифицированной баллистической установке ЦИАМ. Крупная птица массой ~ 2,8 кг и две птицы массой по ~ 1,4 кг, имитирующие половинки разрезанной лопатками крупной птицы, выстреливались по разным сечениям пера лопатки с помощью пневматической пушки со скоростью до 270 м/с при углах атаки, соответствующих условиям вращения. Испытания выявили условия и места наиболее вероятного возникновения повышенных деформаций и разрушений лопаток вентилятора при столкновении с крупной птицей.

**Ключевые слова:** лопатка вентилятора, птицестойкость, пневмопушка, стендовые испытания.

## Bench bird strike testing of non-rotating fan blade

Shorr B.F.<sup>1</sup>, Gladky I.L.<sup>2</sup>, Mel'nikova G.V.<sup>1</sup>, **Petrov S.B.<sup>1</sup>**, Nikiforov V.S.<sup>1</sup>, Serebryakov N.N.<sup>1</sup>, Matsarenko V.S.<sup>1</sup>, Novoselov A.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CIAM, Moscow

<sup>2</sup> JSC «UEC-Aviadvigatel», Perm'

The article describes bench bird strike testing of an aero-engine fan sector, which consisted of three non-rotating blades. The tests were carried out on a modified CIAM ballistic rig. A large bird weighing ~ 2,8 kg and two birds weighing ~ 1,4 kg, simulating halves of a large bird cut by a blade, were shot at different blade airfoil sections using an air gun at a speed of up to 270 m/s and attack angles corresponding to rotation conditions. The tests revealed the conditions and allocations of the most likely occurrence of increased deformations and destruction of fan blades due to collision with a large bird.

**Keywords:** fan blade, bird-resistance, air gun, bench test.

### Введение

Натурные испытания по попаданию крупной птицы в проточную часть авиационного ГТД согласно отечественным и зарубежным авиационным правилам [1 – 3] должны проводиться на двигателе, либо на рабочем колесе вентилятора на специальном стенде. Такие испытания являются очень дорогостоящими и осуществляются на единичных экземплярах ступеней путем выстреливания птиц из специальных пушек. Информация о подобных испытаниях имеется в работах [4; 5] и в некоторых других редких сообщениях, например, [6].

Перед проведением натурального испытания важно обоснованно наметить место на пере рабочей лопатки вентилятора, по которому будет произведен выстрел.

Это можно выполнить на основе предварительного расчетного анализа, который должен опираться на достаточно надежную модель разрушения тела крупной птицы и данные по повреждению рабочих лопаток при ударном нагружении. Работы в этом направлении проводятся в ряде организаций и отражены во многих публикациях (см., например, обзоры в [7; 8], а также работу [9] по условиям деформационного поведения и высокоскоростного разрушения применяющегося для лопаток титанового сплава ВТ6). Однако достоверность расчетов обычно подтверждается испытаниями по ударному нагружению пластин [10; 11] или модельных колес [12], которые не всегда адекватно отражают реальные условия соударения птиц с лопатками вентиляторов авиационных двигателей.

Альтернативным способом определения наиболее информативного места для заброса крупной птицы, а также проверки достоверности используемых моделей поведения материала лопатки и тела птицы является проведение предварительных, менее дорогостоящих, стендовых испытаний по стрельбе птицами по невращающимся натурным лопаткам. При этом возникает необходимость учета различий в ударном взаимодействии птиц с неподвижными и вращающимися лопатками.

К установке для проведения стендовых испытаний по забросу крупных птиц с большими скоростями предъявляются специальные требования [13; 14]. Необходимо обеспечить прочность и жесткость крепления лопаток с учетом больших динамических нагрузок от удара, возможность регулирования углов заброса птиц на разных радиусах для имитации реального треугольника скоростей и повторное использование оснастки. Должны быть обеспечены прочность и жесткость всех элементов стенда, подвергающихся воздействию ударных нагрузок, и требования по безопасности проведения испытаний.

В ЦИАМ при участии специалистов АО «ОДК-Авиадвигатель» была проведена большая комплексная работа, включающая испытания с забросом птиц на баллистических стендах, расчетное моделирование ударных процессов, определение характеристик материалов при высоких скоростях нагружения и др. В настоящей статье представлены некоторые экспериментальные результаты этой работы, относящиеся к забросу крупных птиц в сектор из трех невращающихся лопаток вентилятора авиационного двигателя на модифицированном баллистическом стенде. Наряду с крупной птицей, масса которой определена по площади входного сечения проточной части вентилятора [1 – 3], забрасывались также вдвое меньшие по массе птицы, приближенно имитирующие наибольший ожидаемый фрагмент, вырезаемый из крупной птицы рабочими лопатками при вращении колеса.

### Особенности удара птицы по вращающейся и невращающейся лопаткам

При отсутствии входного направляющего аппарата на входе в двигатель абсолютная скорость  $c$  птицы при ударе направлена по нормали к плоскости вращения рабочего колеса и принимается равной сумме скорости самолета и встречной скорости птицы. Скорость самолета на режимах, где столкновение с птицами наиболее вероятно, обычно не превышает 80...90 м/с; скорость птицы составляет 10...20 м/с, хотя в редких случаях она может быть значительно выше. Осевая скорость заброса птиц при сертификационных испытаниях принимается равной 100 м/с [1].

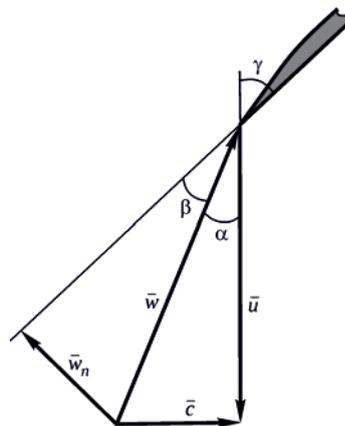


Рис. 1. Разложение абсолютной скорости птицы  $c$  на переносную  $u$  и относительную  $w$  при вращении колеса

На рис. 1 показано разложение абсолютной (осевой) скорости  $c$  заброса птицы при стрельбе по вращающемуся рабочему колесу на переносную  $u$  и относительную  $w$  (по отношению к колесу) скорости. Переносная скорость птицы  $u$  равна окружной скорости колеса на данном радиусе  $R$ . Фактическое столкновение птицы с лопаткой происходит по некоторой поверхности пера, для которой радиус  $R$  можно рассматривать как средний.

При стрельбе по неподвижным лопаткам «ось» птицы направляется по скорости  $w$  и нацеливается на точку в области передней кромки пера, относящейся к такому среднему радиусу. Точка прицеливания может назначаться как на самой кромке пера, так и на некотором расстоянии от нее по хорде сечения, что увеличивает площадь контакта птицы с корытом пера и массу вырезаемого из тела птицы фрагмента, который нагружает лопатку при ударе.

Величина угла  $\alpha(R)$  (см. рис. 1), определяемая формулой

$$\alpha(R) = \arcsin [c/w(R)], \quad (1)$$

для вентиляторов на расчетных режимах обычно меняется в пределах 10...30°.

Давление  $p$ , которое оказывают на лопатку частицы птицы при полном торможении без отскока, называют динамическим. Оно определяется из закона сохранения импульса величиной составляющей  $w_n$  относительной скорости птицы, нормальной к поверхности пера лопатки [15]:

$$p = \rho w_n^2, \quad (2)$$

где  $\rho$  – усредненная по объему плотность тела птицы.

Меняющаяся по радиусу  $R$  величина нормальной скорости  $w_n$  равна

$$w_n(R) = w(R) \sin \beta(R) = w(R) \sin (\gamma(R) - \alpha(R)), \quad (3)$$

где  $\beta(R)$  – угол «атаки» птицы;  $\gamma(R)$  – угол установки сечения пера лопатки у входной кромки.

Для заданной конфигурации пера лопатки, влияющей на угол установки сечений, и заданной осевой скорости птицы  $c$  динамическое давление частиц птицы при ударе на радиусе  $R$  полностью определяется величиной относительной скорости  $w$  и ее направлением (углом  $\alpha$ ) на этом радиусе. Достижимая при забросе птиц величина скорости  $w$  ограничивается возможностью пневмопушки.

При стрельбе по рабочему колесу «ось» птицы совпадает с осью пушки, направленной по оси вращения колеса. Птица, разрушаясь в процессе удара, перемещается относительно движущегося фронта решетки так, что вырезаемые фрагменты птицы нагружают последовательно несколько лопаток (рис. 2,а). Расчеты показывают, что при этом наиболее повреждаются одна или две следующие за первой лопатки, на которые приходится наиболее значительные фрагменты. Незакрашенный многоугольник на рис. 2,а схематично отражает вырезание фрагмента второй лопаткой.

На стенде без вращения колеса удар птицы приходится, в основном, на одну лопатку, хотя, как показали испытания, птица может задеть и соседние лопатки. При столкновении с передней кромкой пера из тела птицы также вырезается некоторый фрагмент, величина которого зависит от шага решетки, точки прицеливания и треугольника скоростей. На рис. 2,б,в показано положение модели птицы с «осью», направленной вдоль относительной скорости  $w$ , позволяющее получать фрагменты большей массы. При ударе сечение пера разворачивается и часть птицы, действующая на лопатку, возрастает (рис. 2,в). В данной работе в качестве массы птицы, приближенно имитирующей наибольший фрагмент крупной птицы, была принята половина от массы всей птицы (при массе крупной птицы  $\sim 2,8$  кг масса наибольшего фрагмента не превышала  $\sim 1,4$  кг).

Постоянные для заданной частоты вращения «статические» напряжения от центробежных сил суммиру-

ются с динамическими напряжениями от удара. Центробежные силы повышают жесткость пера, уменьшая поперечные перемещения сечений от изгиба при ударе, особенно на периферии лопатки. При значительных пластических деформациях, которые возникают при кратковременном разрушении, статические напряжения слабо влияют на условия возникновения начальных деформаций пера лопатки от удара птицей. Однако после появления трещин наличие центробежных сил ведет к отрыву фрагментов пера и их разлету.

### Испытания на модифицированном баллистическом стенде ЦИАМ с регулировочным устройством для заброса птиц

Конструктивные особенности модифицированного баллистического стенда ЦИАМ с регулировочным устройством для заброса птиц на невращающиеся лопатки и сведения по его усовершенствованию описаны в работах [13; 14]. Общий вид регулировочного устройства с установленным пакетом из трех лопаток показан на рис. 3. Координатные линейки использовались для наведения пушки на заданную точку пера средней лопатки.

Наведение пушки на цель осуществлялось по метке, нанесенной на мишень, с использованием лазерного прицела, точность наведения по каждому направлению – порядка 1 мм. Для прицеливания пневмопушка перемещалась в радиальном и окружном направлениях, но направление ее оси, по которому выстреливается птица, не менялось.

Предварительные испытания показали, что при стрельбе от сжатого воздуха максимально достижимая скорость птицы массой до 3 кг не превышает  $\sim 270$  м/с.

Птица забрасывалась на среднюю лопатку, нормальная фиксация которой в криволинейном замковом соединении обеспечивалась боковыми лопатками. Имитация действия центробежных сил, прижимающих

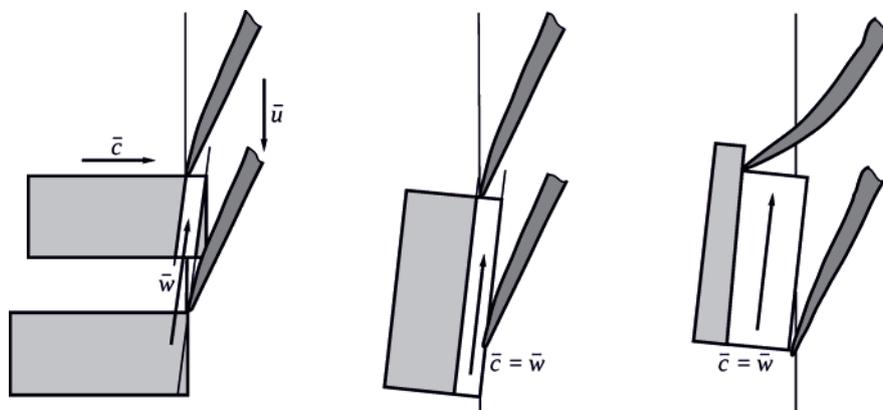


Рис. 2. Различные положения птицы относительно лопаток перед ударом:  
а – при вращении колеса; б, в – на стенде



Рис. 3. Общий вид регулировочного устройства и сектора из трех лопаток

контактные грани хвостовиков лопаток к ответным граням паза, осуществлялась посредством затяжки болтов, проходящих через отверстия в пазах. Соединение опорной плиты и сектора диска – разъемное, с возможностью поворота сектора диска относительно плиты и оси пушки для установления необходимого угла атаки птицы по отношению к средней лопатке в соответствии с треугольником скоростей на выбранном радиусе.

При ударе крупной птицей возникают большие (20...30 тс) усилия, деформирующие лопатку и нагружающие все узлы устройства, которые после сборки и затяжки болтовых соединений должны выдерживать указанные усилия без дефектов и заметных смещений. Это потребовало предварительной доводки устройства.

При подготовке испытаний авторы были жестко лимитированы по срокам и производственным ограничениям. Поэтому достаточно точно определялись только масса, направление и скорость заброса птицы, а современные средства измерения деформаций лопаток не применялись.

### Результаты испытаний

Были выполнены забросы трех птиц: одной крупной птицы массой ~2,8 кг с ударом по верхней половине пера лопатки и двух птиц массой по ~1,4 кг для приближенной имитации ударов ожидаемых фрагментов крупной птицы по разным сечениям лопатки. Усредненная плотность упакованных в пакет птиц со сложенным опереньем, определенная по замеренному объему вытесняемой воды, равнялась  $\rho \approx 800 \text{ кг/м}^3$ , скорости заброса составляли 240...270 м/с.

**Выстрел птицей массой ~1,4 кг по среднему сечению пера лопатки.** Первый выстрел птицей массой  $m = 1,44 \text{ кг}$  был произведен по среднему поперечному сечению  $\bar{z} \approx 0,5$  с замеренной скоростью выстрела  $v = 268 \text{ м/с}$ . Точка прицела была несколько смещена по корыту профиля для увеличения вырезаемого лопаткой фрагмента тела птицы.

При подлете к средней лопатке птица задела кромку передней лопатки, что уменьшило ударяющую массу примерно на 10%. В процессе самого удара средняя лопатка колебалась с видимыми размахами, не задевая за боковые лопатки. Колебания быстро затухали. Фотография пакета лопаток после удара и затухания колебаний, вызванных ударом, показана на рис. 4.

В области удара птицы передняя кромка пера средней лопатки отогнулась в сторону спинки с образованием значительной вмятины. Торцевое сечение пера развернулось в сторону спинки, т.е. противоположно начальной закрученности лопатки, но профиль этого сечения почти не исказился. В некоторых частях пера (у периферийных сечений и задней кромки) имелись незначительные повреждения поверхности, в прикорневых сечениях визуально видимых повреждений не обнаружено. На части поверхности пера появились радиальные неровности, соответствующие продольным линиям сварки внутренней гофрированной перегородки с пером, но вскрытий внутренней полости не отмечено. Две боковые лопатки сохранили исходную конфигурацию.



Рис. 4. Пакет из трех лопаток после удара по сечению средней лопатки на относительной длине пера ~0,5 птицей массой 1,44 кг со скоростью 268 м/с

**Выстрел птицей массой ~1,4 кг по сечению пера лопатки на относительной длине 0,75.** Второй выстрел был произведен птицей массой  $m = 1,46$  кг с измеренной скоростью  $v = 259$  м/с в положении, когда вся птица ударяет по верхней части пера. «Ось» птицы при этом условно была принята расположенной в сечении пера на относительной длине  $\bar{z} \approx 0,75$ .

В процессе удара средняя лопатка колебалась со значительно большими, чем при первом выстреле, размахами, задевая при этом заднюю лопатку. Фотография средней и двух боковых лопаток в деформированном состоянии после заброса птицы и затухания колебаний приведена на рис. 5.

Немного ниже области удара птицы в средней части пера со стороны корыта образовалась трещина вдоль хорды, слегка заметная на рис. 5. Со стороны спинки лопатки вблизи входной кромки произошло выпучивание стенки пера без разрыва. Вблизи торцевого сечения лопатки появилась вмятина.

Вся верхняя половина пера лопатки заметно отогнулась в сторону спинки. В прикорневых сечениях пера лопатки визуально видимых повреждений не отмечено.

**Выстрел птицей массой ~2,8 кг по сечению пера лопатки на относительной длине 0,75.** Выше было указано, что в реальных рабочих условиях на одну лопатку приходится удар не крупной птицы целиком, а только ее фрагментов, вырезаемых лопатками вращающегося колеса. С целью более полного сопоставления с результатами расчетов был произведен выстрел крупной птицей массой  $m = 2,86$  кг со скоростью  $v = 244$  м/с по верхней половине пера средней лопатки (на относительной длине  $\bar{z} \approx 0,75$ ).

При ударе верхняя часть пера лопатки сильно отогнулась, что при продолжающемся давлении разрушающегося тела птицы должно было привести к возрастанию напряжений. В результате в области удара в пере лопатки со стороны корыта возник разрыв вдоль хорды, а со стороны спинки на некотором расстоянии от входной кромки образовался радиальный разрыв вдоль стенки гофрированной перегородки с вскрытием и отслоением стенок гофра. Вблизи торцевого сечения появилась вмятина.

В процессе удара средняя лопатка колебалась со значительными размахами, задевая заднюю лопатку и вызывая ее деформацию. Фотография задней лопатки с видимым отгибом передней кромки в результате ударов испытываемой средней лопатки представлена на рис. 6.

Важным результатом испытания по удару крупной птицей было то, что и в этом, более тяжелом случае, в прикорневых сечениях пера лопатки видимых повреждений обнаружено не было.



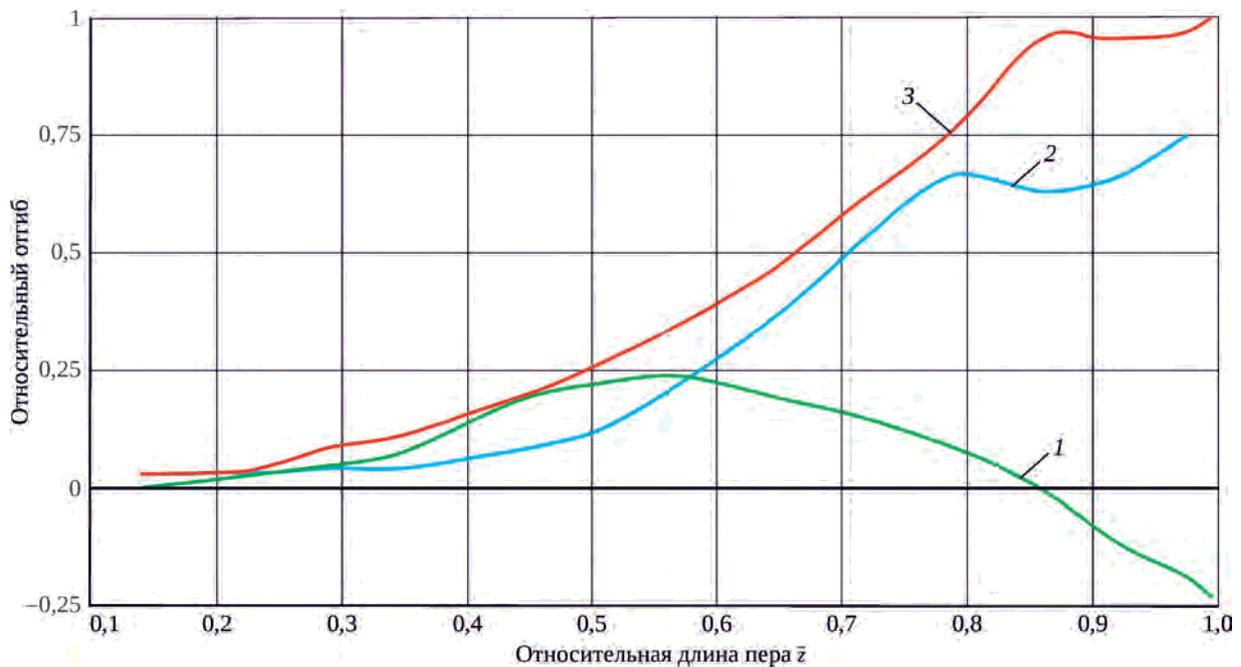
**Рис. 5.** Пакет из трех лопаток после удара по сечению средней лопатки на относительной длине пера  $\sim 0,75$  птицей массой 1,46 кг со скоростью 259 м/с



**Рис. 6.** Отгиб передней кромки задней лопатки в результате ударов испытываемой средней лопатки при забросе крупной птицы массой 2,86 кг



**Рис. 7.** К процедуре измерения остаточных отгибов передней кромки пера лопатки после удара



**Рис. 8.** Распределения остаточных отгибов передней кромки пера по его относительной длине для трех выстрелов птиц — выстрел птицей массой 1,44 кг по среднему сечению пера; — выстрел птицей массой 1,46 кг по сечению пера на относительной длине 0,75; — выстрел птицей массой 2,86 кг по сечению пера на относительной длине 0,75

### Дополнительный анализ экспериментальных данных

Для грубой сравнительной оценки деформаций лопатки при разных условиях удара птицы были проведены приближенные замеры остаточных отгибов передней кромки пера лопатки по разности координат точек в окружном направлении до и после удара (рис. 7). Замеренные указанным способом распределения остаточных отгибов кромки по относительной длине пера для всех трех выстрелов приведены на рис. 8.

При ударе птицей массой 1,44 кг по середине пера (кривая 1) большая часть кромки отогнулась в сторону спинки, но верхняя часть пера отогнулась в противоположную сторону. При ударе схожей по массе птицей (1,46 кг) и крупной птицей (2,86 кг) по верхней части пера (кривые 2 и 3, соответственно) вся передняя кромка, особенно ее уголок, значительно отогнулись.

### Заключение

Показана эффективность стендовых баллистических испытаний рабочих лопаток вентилятора авиационного

двигателя для установления наиболее повреждающего направления выстреливания крупной птицы по рабочему колесу и предварительной оценки прочности прикорневой области и замкового соединения лопаток при ударе крупной птицы нормируемой массы.

Для обеспечения необходимого ударного воздействия крупной птицы на рабочие лопатки без их вращения при стендовых испытаниях потребовалось забрасывать птицы примерно в два раза меньшей массы, моделирующей размеры ожидаемого наибольшего фрагмента, вырезаемого из тела крупной птицы рабочими лопатками при вращении колеса.

Проведенные испытания показали, что при забросе крупной птицы на невращающуюся рабочую лопатку повреждалась, в основном, верхняя часть пера, в то время как в прикорневой и замковой областях значительных пластических деформаций и повреждений не наблюдалось.

Полученные экспериментальные данные послужили основой для валидации применяющихся в ЦИАМ расчетных методов моделирования ударного воздействия крупных птиц на лопатки вентилятора авиационного двигателя.

### Литература

1. Авиационные правила. Ч. 33. Нормы летной годности двигателей воздушных судов / Межгос. авиац. комитет. 2012. Попадание птиц. § 33.76. С. 45–49.
2. Federal Aviation Regulations. Pt. 33. Airworthiness Standards: Aircraft Engines.

- 
3. Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Engines: CS-E: Amendment 4: 12 March 2015 / European Aviation Safety Agency. 2015. 211 p.
  4. Shorr B.F., Inozemtzev A.A., Rudavetz V.A. Numerical and Experimental Analysis of the Bird Strike Fan Resistance // Bird Strike Committee Europe Proceedings and Working Papers, 22nd Meeting, Vienna, 1994. P. 491–498.
  5. Shorr B.F., Mel'nikova G.V., Tishchenko N.T. Numerical and Experimental Analysis of a Large Bird Impact on Fan Blades for the Certification Purpose // Proc. of the 27th Meeting of the International Bird Strike Committee, Athens, Helas, 23–27 May 2005. Vol. 2, WP VII-3. P. 165–172.
  6. Vasko T.J. Fan Blade Bird-Strike Analysis and Design // 7th European LS-DYNA Conference. 2009. P. 13–18.
  7. Thorp J. Fatalities and Destroyed Civil Aircraft due to Bird Strikes, 2002 to 2004 (with an Addendum of Animal Strikes) // International Bird Strike Committee 27th Meeting, Athens, Helas, 23–27 May 2005. P. 17–24.
  8. Hedayati R., Sadighi M. Bird Strike: An Experimental, Theoretical and Numerical Investigation. Amsterdam etc.: Woodhead Publishing, 2016. 258 p.
  9. Экспериментальная верификация моделей деформационного поведения и высокоскоростного разрушения титанового сплава VT6 / М.Ш. Нихамкин, Л.В. Воронов, О.Л. Любчик, И.Л. Гладкий // Изв. Самар. науч. центра Рос. акад. наук. 2011. Т. 13, № 4 (4). С. 991–997.
  10. Wilbeck J.S. Impact Behavior of Low Strength Projectiles: technical report / Air Force Flight Dynamic Laboratory, USA. 1978. 129 p. AFML-TR-77-134.
  11. Liu J., Li Y., Gao X. Bird Strike on a Flat Plate: Experiments and Numerical Simulations // Int. J. of Impact Engineering. 2014. Vol. 70. P. 21–37.
  12. Guan Yupu, Zhao Zhenhua, Chen Wei, Gao Deping. Foreign Object Damage to Fan Rotor Blades of Aeroengine. Part I: Experimental Study of Bird Impact // Chinese J. of Aeronautics. 2007. Vol. 20, no. 5. P. 408–414.
  13. Устройство неподвижной установки рабочих лопаток ГТД для стендовых испытаний: пат. на полез. модель: RU 155513 / Шорр Б.Ф., Серебряков Н.Н., Мацаренко В.С., Шершаков М.С. № 2015113818/28; заявл. 15.04.2015; опубл. 10.10.2015, Бюл. № 28. 10 с.
  14. Шорр Б.Ф., Мацаренко В.С., Серебряков Н.Н. Проектно-экспериментальные работы по созданию установки для стендовых испытаний невращающихся лопаток на птицестойкость // Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун-та им. С.П. Королева (СГАУ). 2015. Т. 14, № 3, ч. 1. С. 88–98.
  15. Shorr B.F. Design of Aviation Engine Elements for Birds Strike Action // BSCE 20, Helsinki, May 21–25, 1990: working papers / Bird Strike Committee Europe. 1990. P. 555–561.

## References

1. Aviatsionnye pravila AP-33. Popadanie ptits [Aviation Regulations. P. 33. Bird Ingestion. Sec. 33.76]. MAK. 2012. P. 45–49.
  2. Federal Aviation Regulations. Pt. 33. Airworthiness Standards: Aircraft Engines.
  3. Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Engines: CS-E: Amendment 4: 12 March 2015 / European Aviation Safety Agency. 2015. 211 p.
  4. Shorr B.F., Inozemtzev A.A., Rudavetz V.A. Numerical and Experimental Analysis of the Bird Strike Fan Resistance // Bird Strike Committee Europe Proceedings and Working Papers, 22nd Meeting, Vienna, 1994. P. 491–498.
  5. Shorr B.F., Mel'nikova G.V., Tishchenko N.T. Numerical and Experimental Analysis of a Large Bird Impact on Fan Blades for the Certification Purpose // Proc. of the 27th Meeting of the International Bird Strike Committee, Athens, Helas, 23–27 May 2005. Vol. 2, WP VII-3. P. 165–172.
  6. Vasko T.J. Fan Blade Bird-Strike Analysis and Design // 7th European LS-DYNA Conference. 2009. P. 13–18.
  7. Thorp J. Fatalities and Destroyed Civil Aircraft due to Bird Strikes, 2002 to 2004 (with an Addendum of Animal Strikes) // International Bird Strike Committee 27th Meeting, Athens, Helas, 23–27 May 2005. P. 17–24.
  8. Hedayati R., Sadighi M. Bird Strike: An Experimental, Theoretical and Numerical Investigation. Amsterdam etc.: Woodhead Publishing, 2016. 258 p.
  9. Eksperimental'naiia verifikatsiia modelei deformatsionnogo povedeniia i vysokoskorostnogo razrusheniia titanovogo splava VT6 / M.Sh. Nikhamkin, L.V. Voronov, O.L. Liubchik, I.L. Gladkii [Experimental Verification of Deformation Behavior and High-Speed Failure Models of Titanic Alloy VT6]. Information of the Samara Science Center of Russia Academy of Sciences. Vol. 13, no. 4 (4). 2011. P. 991–997.
  10. Wilbeck J.S. Impact Behavior of Low Strength Projectiles: technical report / Air Force Flight Dynamic Laboratory, USA. 1978. 129 p. AFML-TR-77-134.
-

- 
11. Liu J., Li Y., Gao X. Bird Strike on a Flat Plate: Experiments and Numerical Simulations // Int. J. of Impact Engineering. 2014. Vol. 70. P. 21–37.
  12. Guan Yupu, Zhao Zhenhua, Chen Wei, Gao Deping. Foreign Object Damage to Fan Rotor Blades of Aeroengine. Part I: Experimental Study of Bird Impact // Chinese J. of Aeronautics. 2007. Vol. 20, no. 5. P. 408–414.
  13. Shorr B.F., Serebriakov N.N., Matsarenko V.S., Shershakov M.S. Ustroistvo nepodviznoi ustanovki rabochikh lopatok GTD dlia stendovykh ispytanii [Device of Unmoving Installation of Gas Turbine Engine Blades for Bench Tests]. Patent of Russian Federation for Useful Model no. 155513, 2015. 10 p.
  14. Shorr B.F., Matsarenko V.S., Serebriakov N.N. Proektno-eksperimental'nye raboty po sozdaniiu ustanovki dlia stendovykh ispytanii nevrashchaisichikhsia lopatok na ptitsestoikost' [Design and Experimental Work on Creating an Installation for Bench Tests of Bird Resistance of Non-Rotating Blades]. Bulletin of the S.P. Korolev Samara State Aerospace University. 2015. Vol. 14, no. 3. Part.1. P. 88–98.
  15. Shorr B.F. Design of Aviation Engine Elements for Birds Strike Action // BSCE 20, Helsinki, May 21–25, 1990: working papers / Bird Strike Committee Europe. 1990. P. 555–561.

*Материалы получены редакцией 13.01.2020*