

УДК 621.81

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТЫ ВЕРТОЛЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ ОТ ПОПАДАНИЯ ПОСТОРОННИХ ПРЕДМЕТОВ

Б. Ф. ШОРР¹, А. В. ГОРЯЧЕВ², В. С. МАЦАРЕНКО³, В. Г. ЖУЛИН⁴, В. В. САВЕНКОВ⁵

¹shorr@ciam.ru, ²goryachev@ciam.ru, ³matsarenko@ciam.ru, ⁴zhulin@ciam.ru

¹⁻⁵ ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения имени П. И. Баранова»
(ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова»)

Поступила в редакцию 1 июля 2015 г.

Аннотация. Рассмотрены результаты верификации разработанной в ЦИАМ математической модели повреждения сеточного устройства защиты вертолетного двигателя от попадания посторонних предметов. С этой целью проведено сопоставление данных расчета с результатами баллистических испытаний макета двигателя при забросе в него крупных градин и птиц. Показана эффективность защитного устройства и достаточная адекватность расчетных моделей, при этом выявлено большое значение условий закрепления защитной сетки, которые влияют на расчетную оценку ее повреждений.

Ключевые слова: попадание посторонних предметов; град; птицы; защитная сетка.

ВВЕДЕНИЕ

Авиационные газотурбинные двигатели, имеющие открытый вход в проточную часть, неизбежно сталкиваются с проблемой попадания в компрессор посторонних для двигателя предметов (ПП) – птиц, градин, льда, твердых частиц с аэродромных покрытий, которые при столкновении с быстровращающимися рабочими лопатками могут привести к их повреждению и даже разрушению с опасными для летательного аппарата последствиями. Особенно сложно предотвратить повреждения роторных узлов от столкновения с крупными птицами и с большими градинами, которые засасываются в самолетный двигатель с осевой скоростью, равной скорости полета. Для вертолетных двигателей, обычно располагаемых в специальных отсеках фюзеляжа, проникновение в двигатель крупных птиц затруднено, а осевая скорость полета перестает оказывать прямое влияние на удар, что позволяет применять для предотвращения попадания ПП защитные сетки, устанавливаемые на входе в двигатель.

В этом случае скорость удара ПП (птиц и градин) по защитной сетке зависит от боковой или вертикальной составляющей скорости полета вертолета и расположения двигателя в отсеке, а также от конструкции сеточного узла.

С целью обеспечения безопасности полетов при попадании ПП в вертолетные двигатели, проверки двигателя на соответствие требованиям Авиационных Правил АП-33 [1, 2] должны проводиться при функционирующем защитном устройстве, поэтому повреждение сетки при ударе допустимо лишь в такой степени, чтобы ее защитные функции сохранились в полной мере. Кроме того, необходимо исключить повреждение деталей проточной части двигателя фрагментами сетки, образовавшимися при ее повреждении.

В работе рассматривается конструкция защитного узла одного из вертолетных двигателей в виде сетки, образующей цилиндрическую поверхность (рис. 1). Края сетки заделываются в резиновую окантовку и крепятся к элементам корпуса, имеющим ребра жесткости (рис. 2). Фиксация краев сетки на двух опорных поверхностях корпуса осуществляется при помощи стяжных металлических ремней.

Данные расчетов стойкости такого устройства при попадании в двигательный отсек вертолета ПП сопоставляются с результатами баллистических испытаний на стенде ЦИАМ Т-15П, выполненных группой специалистов ЦИАМ под руководством С. Б. Петрова при стрельбе по защитному сеточному устройству крупными градинами и птицами.

РАСЧЕТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕТКИ И УДАРА ПП

Защитная сетка и ее крепление. Сетка с размером ячейки 7×7 мм изготавливается из стальной проволоки диаметром 1,2 мм с пределами прочности $\sigma_B = 560$ МПа и текучести $\sigma_{0,2} = 225$ МПа при относительном удлинении $\delta = 40$ %. В расчетах переплетенная сетка моделировалась цилиндрической оболочкой постоянной толщины с прямоугольными отверстиями, расположенными с шагом, равным шагу проволоки в сетке. Площади поперечных сечений модельной прямоугольной «проволоки» и исходной круглой принимались одинаковыми. Конечно-элементная модель сетки показана на рис. 3. Внутренняя поверхность резиновой окантовки считалась жестко соединенной с сеткой с обеих сторон. При предварительных расчетах предполагалось, что внешние поверхности резиновой окантовки жестко связаны с корпусом по всей длине окружности.

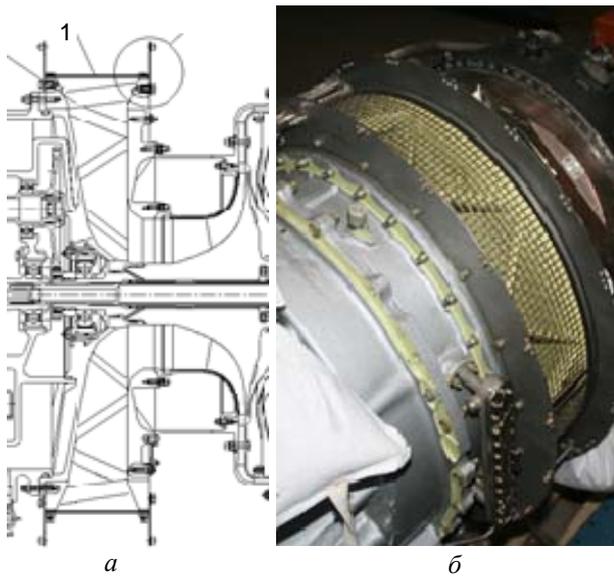


Рис. 1. Эскиз *a* и фотография *б* защитного устройства в виде сетки 1 на входе в вертолетный двигатель

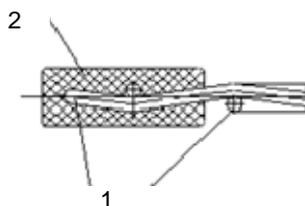


Рис. 2. Закрепление сетки 1 в резиновой окантовке 2

Условия удара ПП по сетке. По требованиям АП-33, масса и количество забрасываемых

в двигатель ПП зависит от площади наименьшего сечения во входном канале двигателя. Применительно к показанной на рис. 1 конструкции сетки при входе воздушного потока в отсек фюзеляжа вертолета сбоку или сверху условной площадью входного канала можно считать площадь проекции защитного устройства на направление потока $F = DL$, где D – диаметр, а L – ширина устройства.

Верификация математической модели защитной сетки проводилась при забросе градин диаметром 25 мм и 50 мм при скорости удара $v_{Г} = 55$ м/с и птицы массой $m = 0,35$ кг при скорости удара по сетке $v_{П} = 40$ м/с.

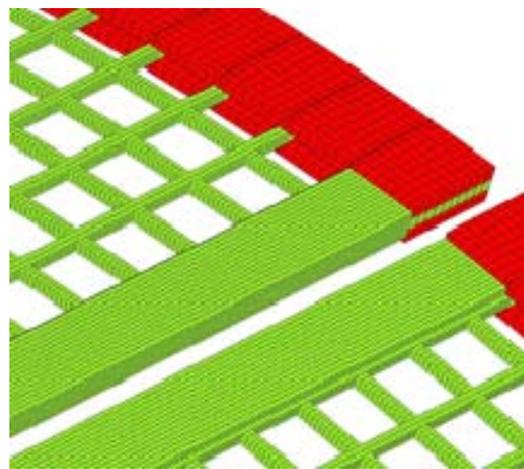


Рис. 3. Расчетный участок защитной сетки с резиновой окантовкой

Градины. Предыдущими исследованиями, в которых рассматривались некоторые основанные на экспериментах математические модели поведения льда в «мягком» и «хрупком» состояниях [3–8], были выявлены наиболее вероятные механические характеристики больших градин. Было установлено, что удар кусков «хрупкого» льда по пластине дает более сильное повреждение, чем удар «мягкого» льда. В расчетах было принято, что градины, которые забрасывались в двигатель, образовались из «хрупкого» льда.

Птицы. Вполне достоверным является значение средней плотности материала тела птицы, близкое к плотности воды. Поэтому при заданной массе можно определить расчетный объем птицы. При расчете птицестойкости защитного устройства использовалась модель материала птицы, который, как и вода, имеет нулевую сдвиговую жесткость. Модель такого типа имеется в банке материалов пакета ANSYS LS-DYNA [9] и была использована в работе.

ПОВРЕЖДЕНИЕ СЕТКИ ОТ ПОПАДАНИЯ КРУПНЫХ ГРАДИН

Результаты предварительного расчетного моделирования. При предварительном расчетном моделировании предполагалось, что резиновая окантовка, плотно стянутая хомутами, не допускает смещений краев сетки в направлении оси защитного устройства.

Было рассчитано 17 вариантов удара, различающихся массой градины, расположением градины относительно сетки и ребер жесткости корпуса перед ударом. На рис. 4, 5 приведены картины повреждения сетки для некоторых вариантов расчета.

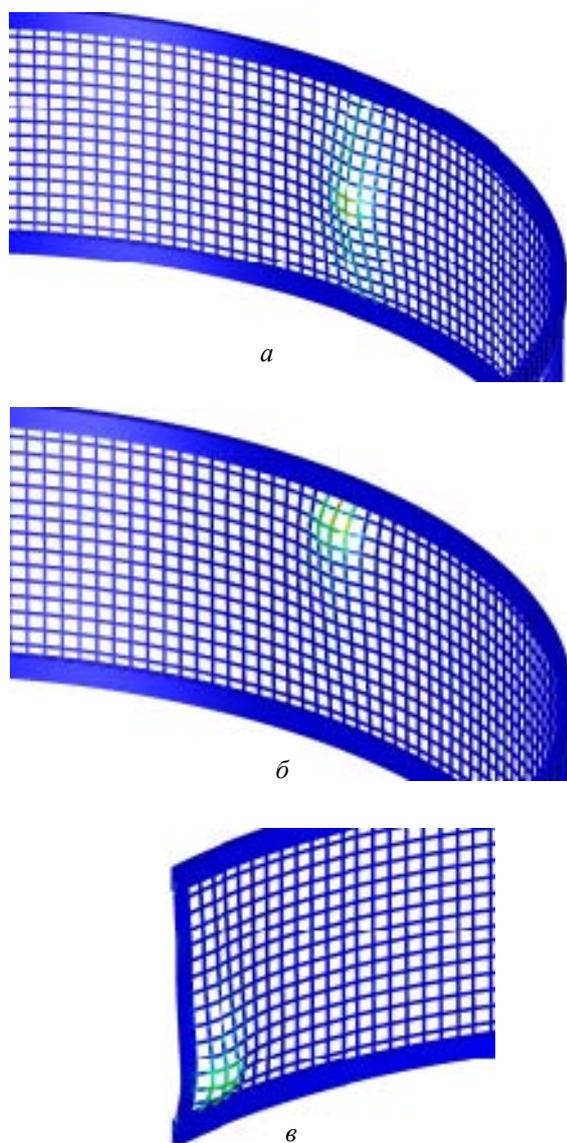


Рис. 4. Расчетное повреждение сетки при ударе градины диаметром 25 мм

При ударе градины диаметром 25 мм по средней части сетки (рис. 4, а) градина продавливает сетку на 14,9 мм, передняя часть гради-

ны разрушается, а оставшаяся часть отскакивает от сетки. Максимальная величина пластических деформаций в сеточной проволоке составляет 11,3 %.

При ударе по сетке вблизи ее заделки в корпус (рис. 4, б) прогиб сетки уменьшается, а локальные пластические деформации в проволоке возрастают. Деформация сетки при ударе в угловую зону показана на рис. 4, в.

При ударе градины диаметром 50 мм по средней части сетки (рис. 5, а) деформации одного из участков проволоки в зоне удара достигли предельного значения, и произошел ее разрыв. При ударе по сетке вблизи ее заделки в корпус (рис. 5, б) сетка разорвалась в окружном направлении в зоне, прилегающей к заделке в резиновую окантовку.

После прекращения поступательного движения градины происходит отброс ее остатков в обратном направлении вследствие упругих свойств материала сетки и окантовки.

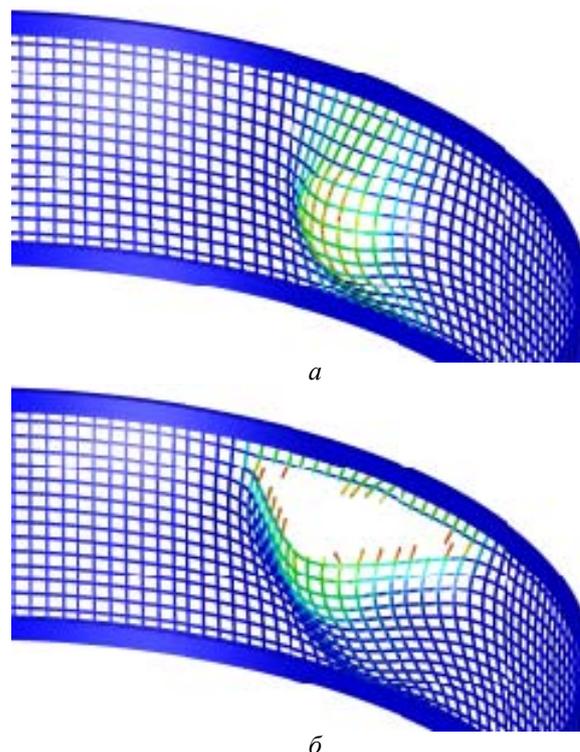


Рис. 5. Расчетное повреждение сетки при ударе градины диаметром 50 мм

Результаты испытаний и верификация расчетной модели. На рис. 6, а показан вид на защитную сетку сверху, а на рис. 6, б – вид сбоку после удара градины диаметра 50 мм. Разрыва проволок не произошло, но сетка значительно деформировалась в области удара (с остаточным прогибом до 45 мм). Резиновая окантовка сетки вышла с обеих сторон из-под стягивающего хомута, и края сетки сместились

вместе с окантовкой, как в осевом, так и в радиальном направлениях. Длина отошедшей части окантовки примерно в три раза превышала диаметр градины.

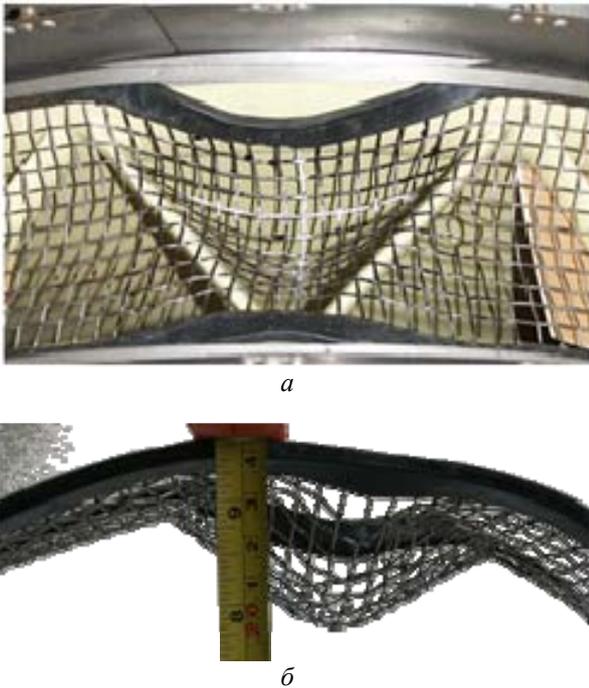


Рис. 6. Повреждение сетки после выстрела градиной диаметром 50 мм

При последующем выстреле градиной диаметром 25 мм по тому же поврежденному месту сетки заметных изменений сетки не произошло.

Для верификации расчетной модели необходимо, чтобы расчетные граничные условия соответствовали экспериментальным. С этой целью была проведена серия расчетов удара градины диаметром 50 мм с измененными граничными условиями. На участках резиновой окантовки, которые в процессе испытаний вышли из-под прижимающего хомута (~140 мм), перемещения краев сетки ограничивались только в радиальном и окружном направлениях, а в осевом направлении допускались. Все остальные параметры модели остались без изменения. Результаты расчета показаны на рис. 7.

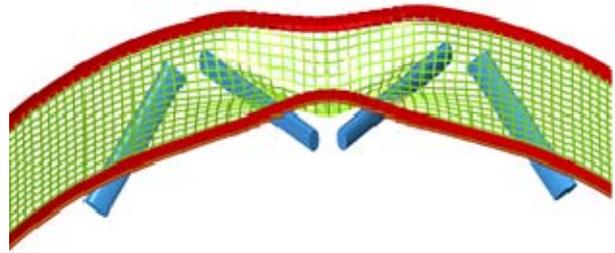


Рис. 7. Расчетное повреждение сетки при ударе градины диаметром 50 мм при закреплении сетки, соответствующем экспериментальному

Сопоставление повреждений сетки на рис. 7, 6, а демонстрирует удовлетворительное совпадение результатов расчета и испытания. Максимальная величина пластических деформаций в материале сетки вблизи заделки составляет 35 % при $\delta = 40$ %. Максимальный остаточный расчетный прогиб сетки равен 41 мм при экспериментальном значении 45 мм.

ПОВРЕЖДЕНИЕ СЕТКИ ОТ ПОПАДАНИЯ ПТИЦЫ

Результаты предварительного расчетного моделирования. Расчеты проводились для случая попадания птицы массой $m = 0,35$ кг в центральную по ширине область защитной сетки при полном закреплении ее краев. При ударе птицы по участку сетки между ребрами сетка прогибается, «ложится» на ребра и, деформируясь, огибает их.

Это приводит к увеличению зазора между краевыми пластинами двух половин защитной сетки. При значительной локальной деформации края сетки происходит ее разрыв с одной стороны (рис. 8, а). Максимальный прогиб сетки достигает 70 мм. Резиновая окантовка не разрушается.

При ударе птицы по участку сетки над ребрами жесткости она также «ложится» на ребра, но не разрушается (рис. 8, б).

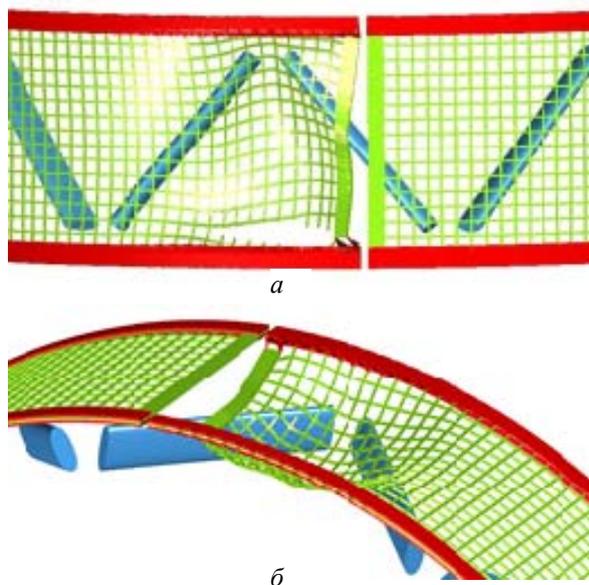


Рис. 8. Расчетные повреждения сетки при забросе птицы массой 0,35 кг

Результаты эксперимента. При ударе птицы массой $m = 0,35$ кг происходит значительная деформация края защитной сетки (рис. 9). Резиновая окантовка выходит из под стягивающего хомута и смещается в осевом и в радиальном направлениях. Размер зоны, на которой сетка вышла из-под хомута, составляет около 100 мм. Проволока защитной сетки при этом не разрывается.

Сравнение экспериментальных картин повреждения защитного сеточного устройства от удара крупной градины диаметра 50 мм при массе $\sim 0,06$ кг и скорости удара 55 м/с (см. рис. 6) и птицы массой 0,35 кг при скорости удара 40 м/с (рис. 9) показывает их качественное совпадение. То же относится к сравнению расчетных картин повреждения сетки (см. рис. 5, 8).



Рис. 9. Повреждение сетки при забросе птицы массой 0,35 кг

Для получения адекватных количественных оценок повреждения сетки необходимо учитывать возможность выполазания ее краев из рези-

новой окантовки при ударе. Расчеты показывают, что приемлемую картину повреждения можно воспроизвести, если освободить края сетки от закрепления в осевом направлении на длине, равной утроенному размеру ширины ПП (диаметру градины или ширине модели птицы).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сопоставление результатов расчетов повреждений защитного сеточного устройства вертолетного двигателя от попадания крупных градин и птиц с экспериментальными данными стрельбы по устройству показало, что используемые в ЦИАМ методики дают адекватную качественную оценку повреждений.

Предварительное численное моделирование процесса удара позволяет выявить направление и область удара по защитному устройству, которые приводят к его наибольшим повреждениям, что сокращает количество и стоимость необходимых натуральных испытаний.

Для получения адекватных количественных оценок последствия ударов посторонних предметов по защитному сеточному устройству необходимо учитывать фактические условия закрепления краев сетки. Расчеты показали, что экспериментально полученную картину повреждения защитного устройства при ударе градин и птиц можно воспроизвести, если освободить края сетки от закрепления в осевом направлении на длине, равной утроенному размеру ширины ПП (диаметру градины или ширине модели птицы).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Авиационные правила**, Часть 33, Нормы летной годности двигателей воздушных судов. МАК. Москва, 2012. [*Aviation Regulations. Part 33 (AP-33)*. (in Russian) Interstate Aviation Committee, 2012.]
2. **Приложение В** к Авиационным правилам, Часть 33, «Нормы летной годности воздушных судов», МАК, М, 2012. [*Aviation Regulations, Part 33 (AP-33), Appendix B*, (in Russian), Interstate Aviation Committee, 2012.]
3. **Tryde P. (Ed.)**, *Physics and Mechanics of Ice*, Springer-Verlag, New York, USA, 1980. [P. Tryde (Ed.), *Physics and Mechanics of Ice*, Springer-Verlag, New York, USA, 1980.]
4. **Лобанов В. А.** Моделирование льда в задачах с конечно-элементной постановкой // Дифференциальные уравнения и процессы управления. №4. 2008. С. 19–29. [V. A. Lobanov, *Ice modeling in problems with finite-element setting* (In Russian), *Differentsial'nye uravneniya i protsessy upravleniya*, no. 4, pp. 19-29, 2008.]
5. **Fasanella E. L., Boitnott R. L., Kollas S.** Dynamic Crush Characterization of Ice. NASA/TM-2006-214278. 2006 [E. L. Fasanella, R. L. Boitnott, S. Kollas, *Dynamic Crush Characterization of Ice*, NASA/TM-2006-214278, 2006.]
6. **Carney K. S., Benson D. J., Bois P. D.** A high strain rate model with failure for ice in LS-DYNE. Proc. of 9th International

al LS-DYNE Users Conference, Dearborn, MI USA. June 4-6. 2006. pp. 1-16. [K. S. Carney, D. J. Benson, P.D. Bois, A high strain rate model with failure for ice in LS-DYNE, Proc. of 9th International LS-DYNE Users Conference, Dearborn, MI USA, June 4-6, 2006, pp. 1-16.]

7. Мельникова Г. В., Мацаренко В. С., Серебряков Н. Н. Математическое моделирование повреждений рабочих лопаток вентиляторов при попадании льда // Труды ЦИАМ № 1344: Современные методы обеспечения прочностной надежности деталей авиационных двигателей. М.: ТОРУС ПРЕСС, 2010. С. 107–118. [G. V. Melnikova, V. S. Matsarenko, N. N. Serbryakov. *Mathematical modeling of fan blades damage under ice hitting* (in Russian), In *Sovremennye metody obespecheniya prochnostnoy nadezhnosti detaley aviatsionnykh dvigateley*, CIAM, Proc. no. 1344, Moscow: Torus Press, 2010, pp. 107-118.]

8. Шорр Б. Ф., Мацаренко В. С. Расчетно-экспериментальное исследование динамического воздействия кусков льда на пластину-имитатор пера рабочей лопатки осевого компрессора авиационного двигателя Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. № 06. 2014. С. 307–317 [B. F. Shorr, V. S. Matsarenko, *Computational and Experimental Researches of Ice Pieces Impact Against a Plate-imitator of a Blade Airfoil of an Aircraft Engine Axial Compressor* (in Russian), *Science and Education*, no. 6, June 2014, Bauman MGTU, Moscow pp. 307-317.]

9. LS-DYNA. Keyword user's manual. Volume II. Material models. Version 971 R6.1.0. Livermore Software Technology Corporation (LSTC), 2012. [LS-DYNA, Keyword user's manual, Volume II, Material models, Version 971 R6.1.0, Livermore Software Technology Corporation (LSTC), 2012.]

ОБ АВТОРАХ

ШОРР Борис Федорович, д-р техн. наук. Гл. науч. сотр. отделения прочности. Область научных интересов: статическая и динамическая прочность авиационных ГТД.

ГОРЯЧЕВ Алексей Владимирович, канд. техн. наук. Нач. отдела отделения авиационных двигателей. Область научных интересов: обледенение двигателей.

МАЦАРЕНКО Виктор Сергеевич, аспирант. Инж. отделения прочности. Область научных интересов: динамическая прочность авиационных ГТД.

ЖУЛИН Вадим Геннадиевич, нач. сектора отделения авиационных двигателей. Область научных интересов: проектирование экспериментального оборудования.

САВЕНКОВ Владимир Валерьевич, млад. науч. сотр. отделения авиационных двигателей. Область научных интересов: испытания двигателей.

METADATA

Title: Calculation and experimental investigation of the effectiveness of helicopter engine protection against foreign objects damage.

Authors: B. F. Shorr¹, A. V. Goryachev², V. S. Matsarenko³, V. G. Zhulin⁴, V. V. Savenkov⁵

Affiliation:

Baranov Central institute of aviation motors.

Email: ¹shorr@ciam.ru ²goryachev@ciam.ru,
³matsarenko@ciam.ru, ⁴zhulin@ciam.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 19, no. 3 (69), pp. 44-49, 2015. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: Verification results of a CIAM's mathematical model of damage of a net device protecting the helicopter engine from strike by foreign objects is considered. For this purpose a comparison of the calculation data to results of ballistic bench tests of an engine model under large hailstones and birds penetration is carried out. Efficiency of the protection device and sufficient adequacy of calculation models is shown. Great importance of protective net fastening conditions which affect estimation of its damage is thus revealed.

Key words: Foreign object damage; hail; bird; protection net device.

About authors:

SHORR, Boris Fedorovich, Doctor of Engineering Sciences, Chief Research Officer at the Department of Strength. Area of research: static and dynamic strength of aviation engines.

GORACHEV, Aleksey Vladimirovich, Candidate of Engineering Sciences, Head of Section at the Department of Engines. Area of research: engine icing.

MATSARENKO, Victor Sergeevich, Postgrad. (PhD) Student, Engineer at the Department of Strength. Area of research: dynamic strength of aviation engines.

ZHULIN, Vadim Gennadievich, Head of Sector at the Department of Engines. Area of research: design of experimental equipment.

SAVENKOV, Vladimir Valerevich, Junior Research Officer. Area of research: engine tests.