

УДК 629.7.036.34

**В. М. МЕРКУЛОВ, А. В. ШЕРЕМЕТЬЕВ, А. В. ПЕТРОВ,
Р. П. ПРИДОРЖНЫЙ, В. В. ДОНЧЕНКО***ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина***КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
КРУПНОЙ ПТИЦЫ С РАБОЧИМИ ЛОПАТКАМИ ВЕНТИЛЯТОРА ТРДД**

В результате расчетно-экспериментального анализа, а также анализа последствий реальных случаев столкновения с крупными птицами отечественных и зарубежных ТРДД, предложена расчетная модель ударного взаимодействия крупной птицы с рабочими лопатками вентилятора ТРДД и проведена ее верификация. С использованием выбранной модели проведено компьютерное моделирование процесса и последствий попадания крупной птицы в вентилятор современного ТРДД с широкохордными бесполочными рабочими лопатками. Предложен методический подход по определению степени опасности для двигателя последствий столкновения с крупной птицей.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, ударное взаимодействие, рабочие лопатки вентилятора ТРДД, крупная птица, расчетно-экспериментальный анализ, расчетная модель, верификация, степень опасности для двигателя, конструктивное подобие

Введение

Современные требования обеспечения безопасности полетов регламентируют подтверждение птицестойкости двигателя при попадании в его воздухозаборное устройство крупной птицы путем проведения специальных стендовых испытаний. При этом, зона заброса птицы относительно входного устройства и рабочего колеса вентилятора, масса, скорость птицы и режим работы двигателя должны быть выбраны так, чтобы обеспечить наиболее неблагоприятные для двигателя последствия удара [1-3]. Прямая проверка этих условий путем забрасывания птиц в работающий двигатель является чрезвычайно трудноосуществимой и дорогостоящей.

Применение компьютерного моделирования ударного взаимодействия крупной птицы с рабочими лопатками вентилятора турбореактивного двухконтурного двигателя (ТРДД) совместно с анализом последствий попадания в проточную часть двигателей при серийной эксплуатации и использования принципов конструктивного подобия [4] позволяет получить качественную и количественную характеристику повреждений лопаток, определить наиболее неблагоприятные условия попадания птицы, а также существенным образом сократить временные и материальные затраты на проектирование и доводку двигателя.

В данной работе представлена расчетная модель ударного взаимодействия крупной птицы с рабочим колесом вентилятора ТРДД. На основании использования этой модели, проведено компью-

терное моделирование процесса и последствий попадания крупной птицы в рабочее колесо вентилятора ТРДД, оценена степень опасности этого события для двигателя, определена зона попадания птицы с точки зрения наибольших повреждений.

1. Постановка задачи исследования

В результате анализа статистики последствий попадания птиц в двигатели летательных аппаратов при их эксплуатации и результатов специальных стендовых испытаний по забросу птиц в работающие двигатели установлено, что наибольшие механические повреждения рабочих лопаток вентилятора ТРДД создают последствия попадания крупных птиц [1-3]. Примеры повреждений рабочих лопаток ТРДД при столкновении с крупной птицей и их классификация показаны в табл. 1.

Из анализа содержания табл. 1 следует, что для обеспечения отсутствия опасных последствий для двигателя необходимо при проектировании обеспечить отсутствие последствий 3-го типа при попадании в двигатель крупной птицы. Необходимы разработка и применение методического подхода, основанного на обеспечении прочности лопатки при ударе птицы, исключающего обрывы частей лопатки с большой кинетической энергией.

Таким образом, целью данной работы является разработка расчетной модели, компьютерное моделирование процесса столкновения крупной птицы с вентилятором ТРДД и анализ его последствий для двигателя. При этом используется принцип конструктивного подобия, позволяющий ис-

пользовать испытания, проводимые на двигателях-прототипах.

Таблица 1

Классификация повреждений рабочих лопаток вентилятора при попадании крупной птицы [1]

Степень повреждения	1	2	3
	Деформация участков пера	Разрушение участков пера	Разрушение лопатки
Характер и расположение повреждений	Смятие и деформация поверхности пера у входной кромки	Разрушения (вырывы) пера на входной кромке	Обрыв пера лопатки по корневому сечению
	Изгиб (выпучивание) участков пера вдоль входной кромки	Отрыв уголков у входной кромки	Обрыв лопатки по первому зубу хвостовика елочного типа
	Отгиб уголков у входной кромки	Разрушения (надрывы, трещины) на торце пера	Вылет лопатки из диска вместе с хвостовиком
	Отгиб торцевой части пера	Обрыв надпочечной части лопатки с антивибрационными полками	—

2. Анализ литературных источников по состоянию проблемы

Процесс удара птицы по лопаткам вентилятора ТРДД относится к высокоскоростному нагружению, которое характеризуется скоростями деформации $\dot{\varepsilon} = 10^2 \dots 10^3 \text{ c}^{-1}$ [5].

Поэтому модель материала лопаток должна учитывать влияние скорости деформации на его прочностные характеристики.

В литературе описаны модели материала лопаток, применяемые для решения задач ударного взаимодействия жесткого и мягкого тел, прочностные свойства которого зависят от скорости его деформирования (увеличиваются при увеличении скорости деформации), например модель изотропного материала с пластически-кинематическим упрочнением - модель Купера-Саймондса (Cowper-Symonds) [3].

В источниках [6-8] описано применение вязкопластической модели Джонсона – Кука (Johnson – Cook) для моделирования поведения материала лопатки при ударном взаимодействии с птицей. Эта

модель материала учитывает пластичность, скорость деформирования и изменение температуры в процессе удара.

Модель птицы, применяемая в задачах расчетного моделирования ударного взаимодействия с рабочими лопатками вентилятора, обычно имеет форму цилиндра с плоскими или закругленными концами, эллипсоида или шара [6, 9].

Модели материала птицы в литературных источниках представлены моделями мягкого разрушающегося тела с упрочнением в зависимости от скорости деформации (пластическим, кинематическим), как правило, имеющие плотность близкую к плотности воды [3, 9] либо гидродинамические модели [1, 2].

При использовании гидродинамической модели птицы, процесс ударного взаимодействия птицы с лопатками вентилятора моделируется как гидроудар.

В настоящее время получили развитие модели материала птицы в виде скопления разряженных частиц (SPH- модель) [3, 7-11].

Как утверждается в источнике [10], расчеты с использованием модели материала птицы как мягкого разрушающегося тела приводят к завышению напряжений и деформаций в лопатках, поэтому применение данной модели при проектировании обеспечивает моделирование процесса ударного взаимодействия птицы и рабочих лопаток вентилятора с увеличенными запасами по прочности. При этом характер повреждений рабочих лопаток вентилятора будет меньший, чем при применении гидродинамической модели.

Не менее важным фактором для получения точных и достоверных результатов расчетного моделирования попадания птицы в двигатель является выбор адекватной модели контактного взаимодействия между птицей и лопатками вентилятора, а также между самими лопатками (в случае если в процессе удара лопатки касаются друг друга).

Модели контактного взаимодействия должны включать в себя модели трения, учитывающие относительные скорости взаимодействующих тел, характер повреждения (эрозионный или пластическое деформирование). При использовании конечно-элементных моделей, важен правильный выбор типа контактного взаимодействия в математической формулировке задачи – контакт типа «узел в поверхность», «поверхность-поверхность» и др. [7, 9].

Описанные выше расчетные модели ударного взаимодействия, материалов птицы и лопаток, модели контактного взаимодействия соударяющихся тел реализованы в конечно-элементных пакетах (например LS-Dyna [7], DYTRAN [1, 2] DYNA3D

[9] и др.) и решают данную задачу в трехмерной объемной постановке.

Большое количество описанных расчетных моделей связано с тем, что они либо моделируют частные случаи, либо дают достоверные результаты в ограниченной области параметров задачи, поэтому данные модели требуют адаптации для решения конкретных задач. Выбор наиболее подходящей расчетной модели для решения поставленной задачи должен быть основан на выборе и анализе ее параметров. Затем проводится ее верификация с экспериментальными данными, подобными случаями попадания птиц в ТРДД в эксплуатации и сравнения с результатами расчетов, полученными с применением других расчетных моделей.

3. Выбор расчетной модели и ее верификация

Выбору расчетной модели ударного взаимодействия крупной птицы с вращающимся рабочим колесом вентилятора ТРДД предшествовал анализ основных ее параметров, таких как:

- форма модели птицы (эллипсоид, цилиндр, цилиндр со сферическими притуплениями) и ее геометрические размеры;
- влияние поступательной скорости птицы и частоты вращения рабочего колеса вентилятора на характер повреждений;
- расстояние и относительное положение относительно рабочего колеса вентилятора;
- плотность конечно-элементной сетки;
- тип и параметры модели контактного взаимодействия;
- модель материала птицы и лопаток (параметры кривой деформирования, параметры упрочнения при динамическом нагружении и др.);
- критерии разрушения.

При прохождении через лопатки рабочего колеса птица разрезается на части, при этом энергия удара, приходящаяся на отдельную лопатку пропорциональна массе части птицы. В результате этого, повреждения получают несколько лопаток. Количество лопаток, подверженных ударному взаимодействию, определяется конструкцией рабочего колеса и корпуса вентилятора, частотой вращения рабочего колеса вентилятора и поступательной скоростью встречи с птицей, а также формой и размерами птицы. По имеющимся случаям попадания крупных птиц в отечественные и зарубежные ТРДД, количество поврежденных рабочих лопаток вентилятора обычно составляет от 3 до 6 шт. [3].

На основании анализа отечественных и зарубежных источников, для расчетного моделирования последствия попадания в вентилятор исследуемого

ТРДД крупной птицы была выбрана следующая расчетная модель (рис. 1).

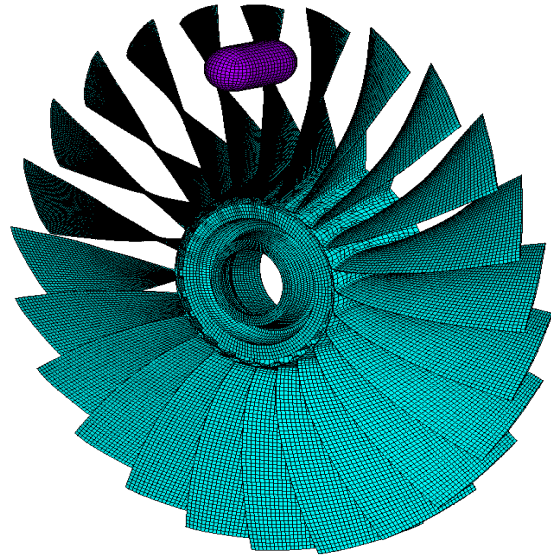


Рис. 1. Расчетная модель для моделирования ударного взаимодействия крупной птицы с рабочим колесом вентилятора

Расчеты проведены по методу конечных элементов в нестационарной динамической постановке с учетом предварительного статического нагружения от центробежных сил. В ходе расчета моделировалась скорость движения птицы и частота вращения вентилятора.

Критерий разрушения – достижение максимальных эквивалентных (по Мизесу) деформаций в конечном элементе, соответствующие предельной деформации при разрушении материала.

При превышении указанной деформации эти конечные элементы исключаются из модели.

Форма птицы – цилиндр со сферическими притуплениями и удлинением (отношением длины к диаметру) равным 2.

Модель материала птицы и лопаток вентилятора с пластическим кинематическим упрочнением Купера-Саймондса, в соответствии с которой динамический предел текучести определяется следующим выражением [3]:

$$\sigma_Y = \sigma_0 \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right],$$

где σ_0 – предел текучести материала при статическом нагружении;

$\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации;

C и P – константы материала.

Характеристики прочности и пластичности титановых сплавов, применяемых для производства рабочих лопаток вентиляторов авиационных ГТД в зависимости от скорости деформирования ($\dot{\epsilon} = 10^2 \dots 10^3 \text{ с}^{-1}$), полученные по аналитической зависимости Купера-Саймондса достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными Института проблем прочности НАН Украины [12].

Примененная кривая деформирования титанового сплава построена при $t = 20^\circ\text{C}$ на основе предела текучести 890 МПа и предела прочности 1010 МПа, которая изменяется в зависимости от скорости деформации.

В соответствии с принятой моделью материала, его прочностные характеристики изменяются в зависимости от скорости его деформирования в каждой зоне лопаток в процессе их ударного взаимодействия с птицей.

В расчетной модели, помимо контактного взаимодействия между птицей и перьями лопаток, также учитывалось контактное взаимодействие лопаток друг с другом (по профильным частям и по полкам хвостовиков).

С использованием выбранной модели был проведен расчет ударного взаимодействия крупной птицы с рабочими лопатками вентилятора ТРДД типов А и Б с различной степенью двухконтурности в условиях специальных стендовых испытаний по вбросу крупной птицы.

Верификация расчетной модели ударного взаимодействия рабочих лопаток вентилятора ТРДД с крупной птицей была основана на сравнительном анализе характера повреждений, полученного в результате расчетов и специальных стендовых испытаний по вбросу крупной птицы в двигатели типов А и Б (рис. 2 и 4) с дальнейшим использованием принципов конструктивного подбора.

В расчетах рабочие лопатки вентилятора моделировались как трехмерные объемные тела, а диск вентилятора представлялся как абсолютно жесткая оболочка.

На рис. 3 показаны характер повреждений и распределение эквивалентных (по Мизесу) динамических напряжений в рабочих лопатках вентилятора двигателя типа А при столкновении с крупной птицей в результате расчета. Характер повреждений представлен вырывом части пера надположной части в районе входной кромки на одной лопатке и загибами входной кромки пера на 5 подряд идущих лопатках, на двух из них – с разрывом материала.

На рис. 5 показаны характер повреждений и распределение эквивалентных (по Мизесу) динамических напряжений в рабочих лопатках вентилятора двигателя типа Б при столкновении с крупной пти-

цей в результате расчета. Характер повреждений представлен загибами входной кромки пера на 5 подряд идущих лопатках без разрывов материала.



Рис. 2. Характер повреждений рабочих лопаток вентилятора двигателя типа А после попадания крупной птицы при специальных стендовых испытаниях

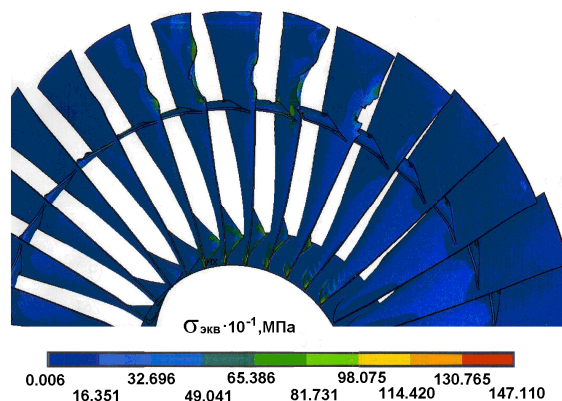


Рис. 3. Распределение динамических напряжений и характер повреждений при ударе крупной птицы в район антивибрационных полок рабочих лопаток вентилятора двигателя типа А

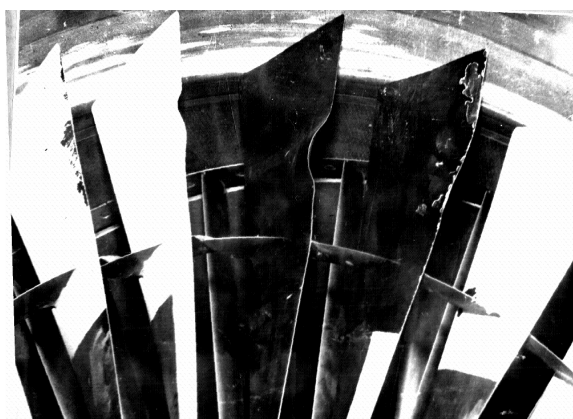


Рис. 4. Характер повреждений рабочих лопаток вентилятора двигателя типа Б после попадания крупной птицы при специальных стендовых испытаниях

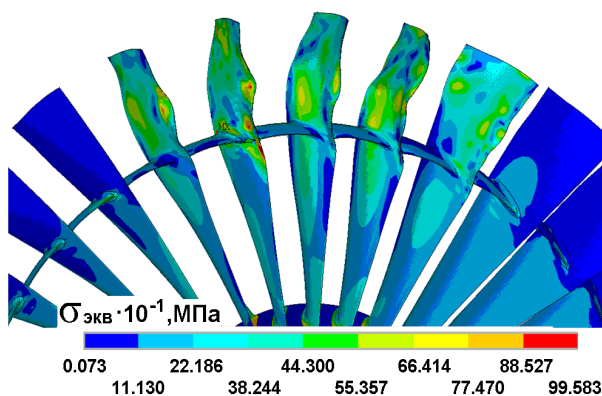


Рис.5. Распределение динамических напряжений и характер повреждений при ударе крупной птицы в район антивибрационных полок рабочих лопаток вентилятора двигателя типа Б

Как видно на рисунках 2...5, получена достаточно хорошая качественная сходимость расчета и эксперимента по количеству поврежденных лопаток и по характеру.

Таким образом, разработанная расчетная модель может быть применена к расчету процесса и последствий ударного взаимодействия крупной птицы с рабочими лопатками вентилятора двигателя подобной конструкции и размерности.

4. Компьютерное моделирование удара крупной птицы

В соответствии с требованиями международных стандартов, для подтверждения работоспособности двигателя после попадания в него крупной птицы необходимо проведение специальных стендовых испытаний по забросу птицы в работающий двигатель. При этом должны быть выполнены условия по точности попадания, массе, скорости вброса птицы, режиму работы двигателя и смоделированы самые неблагоприятные сочетания факторов с точки зрения последствий для двигателя. Поэтому исходные данные для компьютерного моделирования были следующие:

- масса птицы 1,85 кг (для данной площади входного устройства);
- осевая скорость птицы 103 м/с;
- режим работы двигателя взлетный.

В расчетах рабочее колесо вентилятора представлялось как моноколесо, при этом диск, ножка хвостовика, полки хвостовика, формирующие прочную часть, профиль пера рабочей лопатки вентилятора имели реальную геометрию.

Расчеты выполнялись для различных радиусов заброса птицы. При этом, наибольшие повреждения вызываются попаданием птицы в район периферийных сечений лопаток (рис. 6).

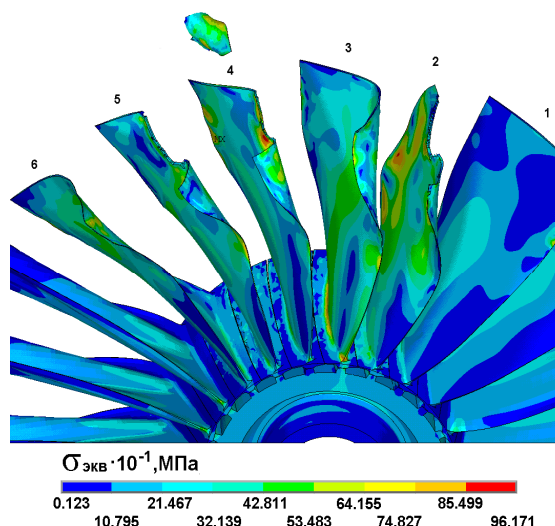


Рис. 6. Распределение динамических напряжений и характер повреждений при ударе крупной птицы в периферийное сечение лопатки

Как указывалось выше, наибольшую опасность для двигателя представляет обрыв рабочей лопатки вентилятора по корневому сечению пера или по хвостовику в результате столкновения с крупной птицей. Поэтому в качестве критерия опасности последствий для двигателя выбиралось условие неразрушения лопатки в критических зонах 1-8, показанных на рис 7.

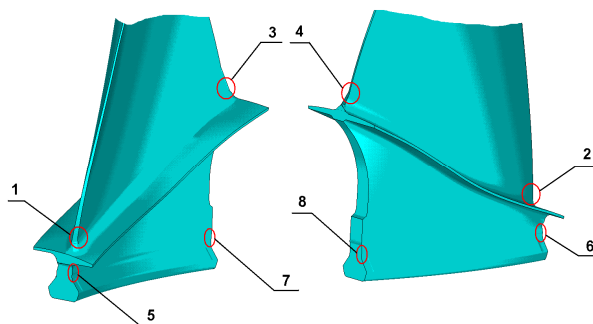


Рис. 7. Критические зоны на лопатке для оценки опасных последствий для двигателя

В результате компьютерного моделирования, при попадании крупной птицы в рабочее колесо вентилятора на радиусе, соответствующему периферийному сечению пера лопаток, характер повреждений представлен загибами входной кромки пера на 5 подряд идущих лопатках, на трех лопатках оборваны фрагменты периферийной части пера (рис. 6). Также на рис. 6 указаны количество и номера поврежденных лопаток.

Исходя из радиуса расположения и размеров оборвавшихся фрагментов, можно считать, что они вылетят в наружный контур без опасных последствий для двигателя.

На рис. 7 показаны зависимости эквивалентных динамических напряжений в критических зонах от времени ударного взаимодействия для шести лопаток, подверженных удару.

Как видно из рис. 8, действующие в критических зонах напряжения не превышают предела прочности материала, что подтверждает отсутствие опасных последствий для двигателя.

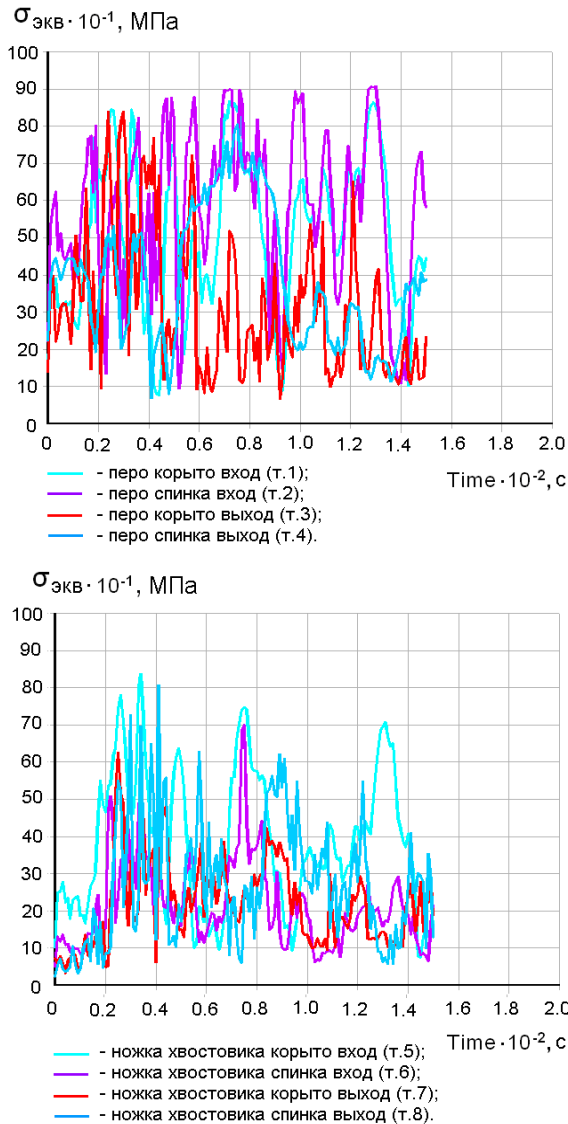


Рис. 8. Изменение динамических напряжений в критических зонах при ударе птицы на периферийное сечение лопатки (лопатка №4)

Таким образом, обеспечение прочности в указанных зонах лопатки является основанием для подтверждения отсутствия опасных последствий для двигателя, вызванных обрывом лопатки (лопаток) по корневому сечению или по ножке хвостовика.

Полученные результаты компьютерного моделирования будут использованы для выбора параметров зачетных испытаний на птицестойкость ТРДД при вбросе в него крупной птицы.

Заключение

1. В результате проведенного анализа реальных случаев столкновения с крупными птицами отечественных и зарубежных авиационных ГТД, а также верификации с расчетными и экспериментальными результатами по двигателям разработки ГП «Ивченко-Прогресс», выбрана расчетная модель ударного взаимодействия крупной птицы с рабочими лопатками вентилятора ТРДД, которая при использовании конструктивного подобия, позволяет получать результаты с достаточными для практики точностью и достоверностью.

2. В результате компьютерного моделирования установлено, что при попадании крупной птицы в рабочее колесо вентилятора ТРДД с широкохордными рабочими лопатками принятой конструкции опасные последствия для двигателя не ожидаются.

3. Результаты данного компьютерного моделирования могут быть использованы для подготовки и проведения сертификационных испытаний по вбросу в двигатель крупной птицы.

Литература

1. Оценка работоспособности ТРДД с большой степенью двухконтурности с деформированным вследствие попадания птицы вентилятором на основе 3D-математического моделирования [Текст] / Б. Ф. Шорр, Г. В. Мельникова, В. Е. Макаров и др. // Новые технологические процессы и надежность ГТД. Предотвращение опасных отказов при разрушении рабочих лопаток турбокомпрессора : сб. науч. тр. ЦИАМ ; под ред. Ю. А. Ножницкого. – М., 2008. – Вып. 8. – С. 188-201.
2. Шорр, Б. Ф. Компьютерное моделирование ударного взаимодействия крупной птицы с лопатками вентилятора самолетного ГТД [Текст] / Б. Ф. Шорр, Г. В. Мельникова, С. А. Сергеевский // Новые технологические процессы и надежность ГТД : сб. науч. тр. ЦИАМ. – М., 2008. – Вып. 8. – С. 172-187.
3. Отработка способа повреждения лопатки вентилятора биомассой на основе бессточного метода сглаженных частиц [Текст] / М. Ш. Нухамкин, О. Л. Любчик, Л. В. Воронов и др. // Аэрокосмическая техника. – 2012. – № 32. – С. 7-24.
4. Шереметьев, А. В. Обоснование возможности обеспечения прочностной надёжности авиационных ГТД на основе использования концепции конструктивного подобия основных деталей [Текст] / А. В. Шереметьев // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 10 (87). – С. 114-118.
5. Каримбаев, Т. Д. Параметры материалов, чувствительные к скоростям деформации [Текст] / Т. Д. Каримбаев // Новые технологические процессы и надежность ГТД. Предотвращение опасных отказов при разрушении рабочих лопаток турбоком-

прессора : сб. науч. тр. ЦИАМ ; под ред. Ю. А. Ножницкого. – М., 2008. – Вып. 8. – С. 7-37.

7. Orłowski, M. *Experimental and Numerical Investigation on the Bird Impact Resistance of Novel Composite Sandwich Panels [Text] : PhD Thesis : M. Orłowski / School of Aerospace, Transport and Manufacturing (SATM), Centre of Applied Mechanics, Cranfield University, 2015. – 330 p.*

8. *Modeling Bird Impact on a rotation Fan: The Influence of Bird Parameters [Text] / M. Selezneva, P. Stone, T. Moffat at all // Proceedings of 11th International LS-DYNA Users Conference. – 46 p.*

9. *Bird strike on an engine primary compressor with high rotating speed: Numerical simulations and parametric study [Text] / Jia Huang, Yulong Li, Zhixue Zhang at all // Proceedings of ICCM2015. – 11 p.*

10. Niering, E. *Simulation of Bird Strikes on Turbine Engines [Text] / E. Niering // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 1990. – Vol. 112, № 6. – P. 573-578.*

11. Генесин, Л. Ю. Сравнение расчетных моделей анализа ударного взаимодействия лопатки с птицей : Доклады Российской конференции пользователей систем MSC [Электронный ресурс] / Л. Ю. Генесин. – Режим доступа: http://www.mscsoftware.ru/document/conf/Moscow_conf/conf_2001/CIAM.pdf. – 13.03.2016.

12. Heimbs, S. *Coputation Methods for Bird Strike simulation : a Review [Text] / S. Heimbs // Computers and Structures. – 2011. – № 89. – P. 2093-2112.*

13. *Прочность материалов и конструкций [Текст] : монография ; под ред. В. Т. Троценко. – К. : Академперіодика, 2005. – 1088 с.*

References

1. Shorr, B. F., Mel'nikova, G. V., Makarov, V. E., Shorstov, V. A. Ocenka rabotosposobnosti TRDD s bol'shoj stepen'ju dvuhkonturnosti s deformirovannym vsledstvie popadanija pticy ventiljatorom na osnove 3D-matematicheskogo modelirovanija [The performance evaluation of a high bypass ratio turbojet engine with a deformed fan due to a bird impact using 3D mathematical modeling]. *Trudy CIAM. Novye tehnologicheskie processy i nadezhnost' GTD. Predotvrashhenie opasnyh otkazov pri razrushenii rabochih lopatok turbokompressora* [New technological processes and reliability of GTE. Prevention of dangerous failures in case of destruction of turbocompressor working blades]. Moscow, 2008, vol. 8, pp. 188-201.

3. Shorr, B. F., Mel'nikova, G. V., Sergievskij, S. A. Komp'juternoe modelirovanie udarnogo vzaimodejstvija krupnoj pticy s lopatkami ventiljatora samoletnogo GTD [Computer simulation of the shock interaction of a large bird with the blades of an aircraft GTE fan]. *Trudy CIAM. Novye tehnologicheskie processy i nadezhnost' GTD* [New technological processes and reliability of GTE]. Moscow, CIAM Publ., 2008, vol. 8, pp. 172-187.

4. Nihamkin, M. Sh., Ljubchik, O.L., Voronov, L. V. Semenova, I. V. Otrabotka sposoba povrezhdenija lopatki ventiljatora biomassoju na osnove bessetochnogo metoda sglazhennyh chastic [Elaboration of the method for damaging the fan blade with biomass based on the gridless method of smoothed particles]. *Trudy vestnik PNIPU. Ajerokosmicheskaja tehnika [Aerospace Engineering]*. Perm', 2012, no. 32, pp. 7-24.

5. Sheremet'ev, A. V. Obosnovanie vozmozhnosti obespechenija prochnostnoj nadjozhnosti aviacionnyh GTD na osnove ispol'zovanija koncepcii konstruktivnogo podobija osnovnyh detalej [Substantiation of the possibility of ensuring the strength reliability of aircraft GTE basing on the concept of constructive similarity of the main parts]. *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija*, 2011, no. 10(87), pp. 114-118.

6. Karimbaev, T. D. Parametry materialov, chuvstvitel'nye k skorostjam deformacii [Material parameters sensitive to strain rates]. *Trudy CIAM. Novye tehnologicheskie processy i nadezhnost' GTD. Predotvrashhenie opasnyh otkazov pri razrushenii rabochih lopatok turbokompressora. [New technological processes and reliability of GTE. Prevention of dangerous failures in case of destruction of turbocompressor working blades]*. Moscow, 2008, vol. 8, pp. 7-37.

7. Orłowski, M. *Experimental and Numerical Investigation on the Bird Impact Resistance of Novel Composite Sandwich Panels : PhD Thesis. School of Aerospace, Transport and Manufacturing (SATM), Centre of Applied Mechanics, Cranfield University, 2015. 330 p.*

8. Selezneva, M., Stone, P., Moffat, T. K. Behdinar, C. Poon, Modeling Bird Impact on a rotation Fan: The Influence of Bird Parameters. *Proceedings of 11th International LS-DYNA Users Conference*. 46 p.

9. Huang, Jia., Li, Yulong., Zhang, Zhixue., Liu, Jun., Tang, Zhongbin. Bird strike on an engine primary compressor with high rotating speed : Numerical simulations and parametric study. *Proceedings of ICCM2015*. 11 p.

10. Niering, E. Simulation of Bird Strikes on Turbine Engines. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1990, vol. 112, no. 6, pp. 573-578.

11. Genesin, L. Ju. *Sravnenie raschetnyh modelej analiza udarnogo vzaimodejstvija lopatki s pticej : Doklady Rossijskoj konferencii pol'zovatelej sistem* [Comparison of the calculation models for the analysis of impact interaction between the blade and the bird: Reports of the Russian Conference of Users of MSC Systems]. Available at: http://www.mscsoftware.ru/document/conf/Moscow_conf/conf_2001/CIAM.pdf (accessed 13.03.2016).

12. Heimbs, S. Coputation Methods for Bird Strike simulation: A Review. *Computers and Structures*, 2011, no. 89, pp. 2093-2112.

13. Troschenko, V. T. *Prochnost' materialov i konstrukcij* [Strength of materials and structures]. Kiev, Akademperіодика Publ., 2005. 1088 p.

Поступила в редакцию 18.02.2017, рассмотрена на редколлегии 8.06.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. конструкции авиационных двигателей С. В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков.

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ УДАРНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ВЕЛИКОГО ПТАХА З РОБОЧИМИ ЛОПАТКАМИ ВЕНТИЛЯТОРА ТРДД

В. М. Меркулов, О. В. Шереметьев, О. В. Петров, Р. П. Придорожний, В. В. Донченко

У результаті розрахунково-експериментального аналізу, а також аналізу наслідків реальних випадків зіткнення з великими птахами вітчизняних і закордонних ТРДД, запропонована розрахункова модель ударної взаємодії великого птаха з робочими лопатками вентилятора ТРДД і проведена її верифікація. З використанням обраної моделі поведене комп'ютерне моделювання процесу й наслідків влучення великого птаха у вентилятор сучасного ТРДД із широкохордними не бондажованими робочими лопатками. Запропоновано методичний підхід по визначенню ступеня небезпеки для двигуна наслідків зіткнення з великим птахом.

Ключеві слова: комп'ютерне моделювання, ударна взаємодія, робочі лопатки вентилятора ТРДД, великий птах, розрахунково-експериментальний аналіз, розрахункова модель, верифікація, ступінь небезпеки для двигуна, конструктивна подібність

COMPUTER MODELLING OF SHOCK INTERACTION OF THE LARGE BIRD WITH HIGH BYPASS RATIO TURBOFAN FAN BLADES

V. M. Merkulov, A. V. Sheremetyev, A. V. Petrov, R. P. Pridorogny, V. V. Donchenko

As a result of the experimental-calculated analysis, and the analysis of consequences of real cases of collision with large birds domestic and foreign high bypass ratio turbofans, the calculated model of shock interaction of a large bird with high bypass ratio turbofan fan blades is offered and its verification is spent. With use of the chosen model computer modelling of process and consequences of a large bird impact to the modern high bypass ratio turbofan with wide horde shroudless fan blades is led. The methodical approach by definition of degree of danger to the engine of consequences of collision with a large bird is offered.

Keywords: computer modelling, shock interaction, high bypass ratio turbofan fan blades, a large bird, experiment-calculated analysis, calculated model, verification, degree of danger to the engine, similarity of the design

Меркулов Вячеслав Михайлович – канд. техн. наук, Первый заместитель директора предприятия - Главный конструктор, ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: v.merkulov@ivchenko-progress.com.

Шереметьев Александр Викторович – канд. техн. наук, Заместитель главного конструктора по прочности, ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: 03530@ivchenko-progress.com.

Петров Алексей Владимирович – канд. техн. наук, руководитель группы, ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: 03530@ivchenko-progress.com.

Придорожний Роман Петрович – канд. техн. наук, ведущий инженер, ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: 03530@ivchenko-progress.com.

Донченко Вячеслав Владимирович – инженер - конструктор 2 категории, ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: 03530@ivchenko-progress.com.

Merkulov Vyacheslav Michaylovich - Candidate of Technical Science, First deputy director of enterprise - chief designer, SE "Ivchenko-Progress", Zaporozhye, Ukraine, e-mail: v.merkulov@ivchenko-progress.com.

Sheremetyev Aleksandr Victorovich - Candidate of Technical Science, Deputy chief designer at strength, SE "Ivchenko-Progress", Zaporozhye, Ukraine, e-mail: 03530@ivchenko-progress.com.

Petrov Aleksey Vladimirovich – Candidate of Technical Science, head of group, SE "Ivchenko-Progress", Zaporozhye, Ukraine, e-mail: 03530@ivchenko-progress.com.

Pridorogny Roman Petrovich – Candidate of Technical Science, leading engineer, SE "Ivchenko-Progress", Zaporozhye, Ukraine, e-mail: 03530@ivchenko-progress.com.

Donchenko Vyacheslav Vladimirovich – second category designer, SE "Ivchenko-Progress", Zaporozhye, Ukraine, e-mail: 03530@ivchenko-progress.com.