

УДК 629.7.036.34

## РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПОПАДАНИИ НА ВХОД ПТИЦ

М.В. КУЗЬМИН, А.Р. КИРСАНОВ

Статья представлена доктором технических наук, профессором Сиротиним Н.Н.

Представлены результаты численного моделирования заброса птиц на вход в газотурбинный авиационный двигатель. Проводится оценка птицестойкости двигателя на основе сравнительного анализа повреждений рабочих лопаток вентилятора в тестовых забросах птиц.

**Ключевые слова:** газотурбинный авиационный двигатель, птицестойкость, заброс птиц, повреждаемость, разрушение.

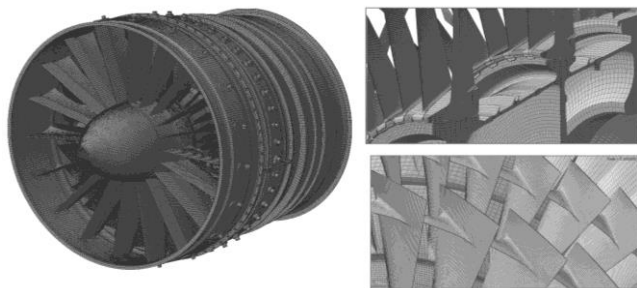
### Введение

Обеспечение работоспособности газотурбинного двигателя (ГТД) при попадании на вход посторонних предметов является одной из важных задач при создании современных авиационных комплексов. Попадание птиц на вход в двигатель, помимо необходимого восстановительного ремонта, может привести к недопустимой потере тяги в полете, досрочному съему двигателя с эксплуатации или стать предпосылкой к тяжелым летным происшествиям.

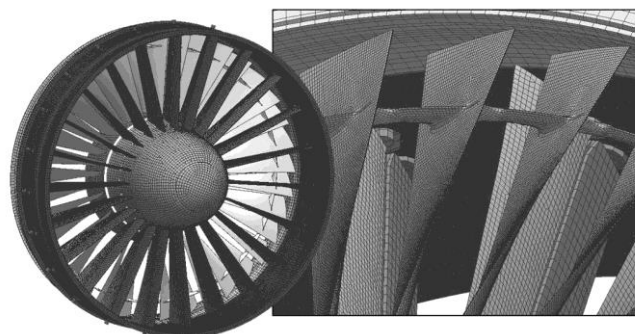
В данной статье приводятся результаты моделирования заброса птиц на вход в двигатель. Исследуемый двигатель является ресурсно-тяговой модернизацией серийно эксплуатируемого прототипа. Двигатели имеют близкие частоты вращения на рабочих режимах и схожую геометрию проточной части. На основе двух тестовых случаев попадания мелких птиц в двигатель была проведена сравнительная оценка птицестойкости тестируемого двигателя с прототипом.

На следующем шаге определялись повреждения проточной части компрессора низкого давления (КНД) в серии забросов мелкой и средней птицы на вход двигателя. Варьировались как режимы работы силовой установки, так и место попадания птиц.

На рис. 1 показана конечно-элементная модель (КЭ-модель) КНД, использованная для моделирования попадания птиц в двигатель. КЭ-модель двигателя-прототипа для заброса птиц показана на рис. 2. По результатам сравнительного анализа характера повреждений рабочих лопаток первой ступени КНД исследуемого двигателя с прототипом определялось влияние внесенных изменений в конструкцию на птицестойкость изделия. Расчетная модель заброса птиц в двигатель-прототип предварительно была освидетельствована по результатам специальных стендовых испытаний.



**Рис. 1.** КЭ-модель КНД проектируемого двигателя



**Рис. 2.** КЭ-модель ВНА и первой ступени КНД двигателя-прототипа

Модель птицы для расчетного заброса в двигатель тестировалась с использованием экспериментов доктора Джеймса Вилбека при высокоскоростном попадании цыпленка в жесткую пластину [1]. Материал птицы был описан как низкопрочный материал с уравнением состояния воды без пористости с плотностью  $950 \text{ кг/м}^3$  [1; 2]. Птица моделировалась SPH-методом [3; 4].

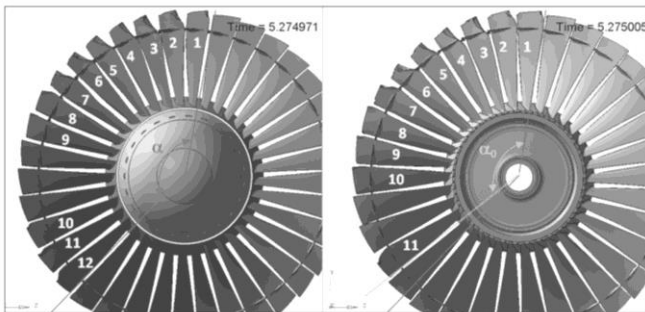
Для прогнозирования разрушений рабочих лопаток КНД применялась модель материала с изотропным упрочнением и интегральной характеристикой накопления повреждений [5; 6]. Модель учитывает влияние скорости деформации на упрочнение, содержит критерий разрушения, зависящий от жесткости и вида напряженного состояния и от величины характерного размера элементов. Описание использованной модели деформирования и разрушения материала рабочих лопаток представлено в [7].

### Сравнительная оценка птицестойкости тестируемого двигателя с прототипом

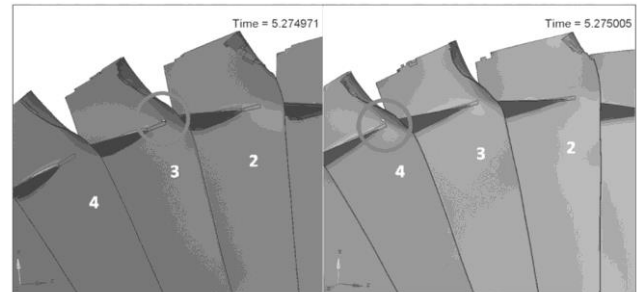
Первый тестовый случай для сравнения разрабатываемого двигателя с прототипом: заброс воробья массой 57 г в зону концевой части рабочих лопаток первой ступени КНД на скорости 69 м/с (250 км/ч) на максимальном стендовом режиме в периферию стойки входного направляющего аппарата (ВНА).

Повреждения: вмятины с разрывом и вырывы по входной кромке, одна сквозная трещина по antivибрационной полке, погнутости входных кромок лопаток с торцов.

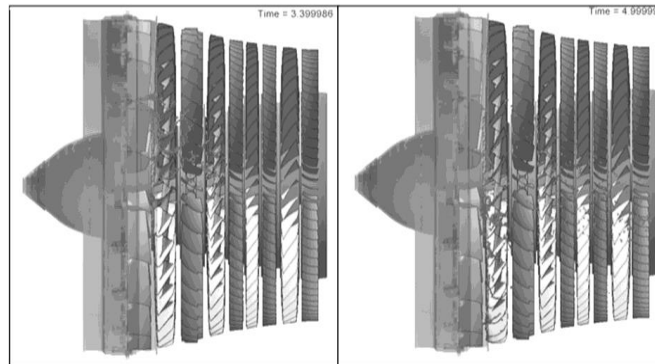
Результаты сравнения: количество поврежденных лопаток  $N \approx N_0$  и сектора повреждения  $\alpha \approx \alpha_0$  (рис. 3); получены качественно идентичные повреждения, в том и другом случае единственная сквозная трещина по antivибрационной полке (рис. 4). Анализ процесса взаимодействия лопаток первой ступени КНД с птицей показал, что разрушение рабочих лопаток по кромке происходит в результате задевания закрылков ВНА. Повреждения рабочих лопаток второй ступени КНД двигателя отсутствуют (рис. 5).



**Рис. 3.** Деформирование лопаток первой ступени КНД в тестовом случае 1: а – прототип; б – тестируемый двигатель

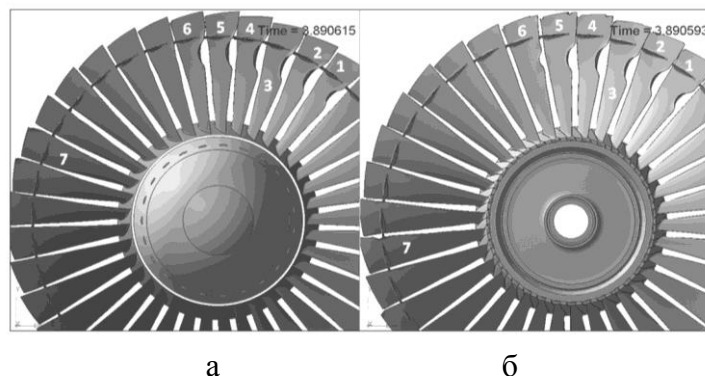


**Рис. 4.** Повреждения лопаток первой ступени КНД в тестовом случае 1: а – прототип; б – тестируемый двигатель



**Рис. 5.** Динамическая картина взаимодействия птицы с КНД двигателя

Во втором тестовом случае воробей забрасывался в зону концевой части рабочих лопаток под антивибрационные полки при тех же условиях. Повреждения: вмятины и погнутости передней кромки рабочих лопаток первой ступени КНД без разрушений (рис. 6).



**Рис. 6.** Деформирование лопаток первой ступени КНД в тестовом случае 2:  
а – прототип; б – тестируемый двигатель

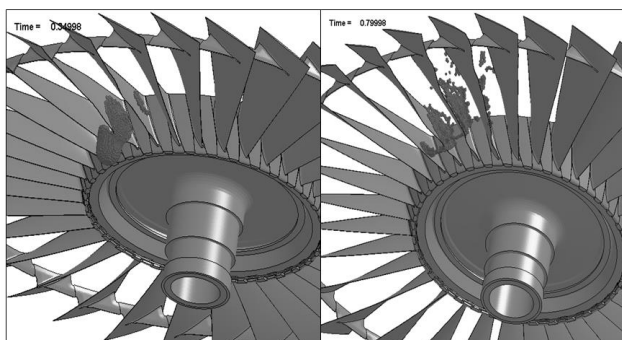
Тестовые расчеты показали, что внесенные изменения в конструкцию не повлияли на птицестойкость элементов проточной части КНД. В диапазоне тестовых условий испытаний птицестойкость проектируемого двигателя находится на уровне успешно эксплуатируемого изделия-прототипа. Расчетная модель проектируемого двигателя была разработана по валидированной методике, освидетельствованной на стадии тестирования модели двигателя прототипа. Поэтому ее точность и чувствительность также соответствуют уровню валидированной модели прототипа. На основании этого используем ее для оценки повреждаемости элементов проточной части КНД при различных условиях заброса птиц на вход проектируемого двигателя.

### Серия расчетных забросов птиц на вход в двигатель

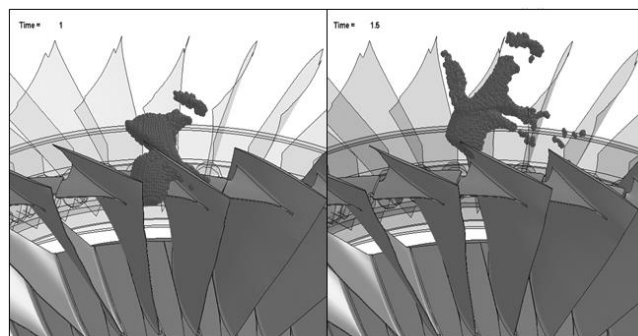
В ходе выполненной серии расчетных забросов птиц варьировались режимы работы двигателя, место попадания и категория птиц. Работоспособность двигателя определялась по характеру повреждений элементов проточной части КНД – по необходимости выключения двигателя.

Столкновение с воробьем массой 57 г на взлете  $H = 100$  м, на скорости 111 м/с. Птица забрасывалась в область корневого сечения рабочих лопаток. Длительность взаимодействия птицы с лопатками первой ступени составила около 1 мс. Были обнаружены незначительные погнутости входной кромки и повреждения с торцов на трех рабочих лопатках (рис. 7).

Попадание мелкой птицы массой 57 г на режиме "малый газ" (МГ),  $V = 75$  м/с в периферию рабочих лопаток (РЛ) в область над антивибрационными полками. Длительность взаимодействия птицы с лопатками первой ступени около 1,3 мс. Картина деформирования рабочих лопаток показана на рис. 8. Повреждения входных кромок рабочих лопаток отсутствуют.

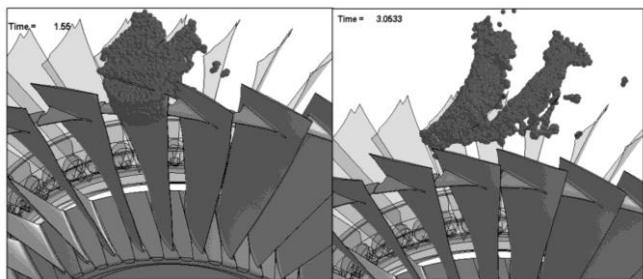


**Рис. 7.** Попадание мелкой птицы в корневое сечение на взлете  $H = 100$  м

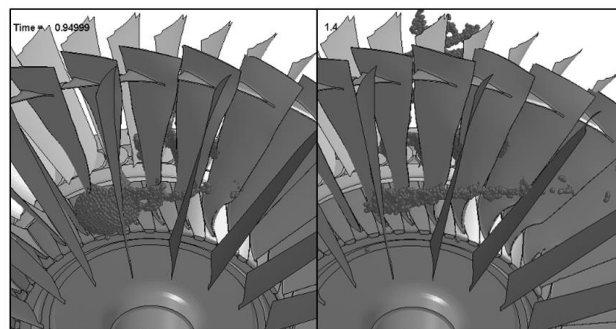


**Рис. 8.** Попадание мелкой птицы над антивибрационными полками на режиме МГ

В следующем расчетном случае средняя птица массой 300 г забрасывается в периферию рабочих лопаток первой ступени КНД на режиме "малый газ". Длительность взаимодействия птицы с лопатками первой ступени около 2 мс. Повреждения входных кромок рабочих лопаток отсутствуют (рис. 9).



**Рис. 9.** Попадание средней птицы над антивибрационными полками на режиме МГ

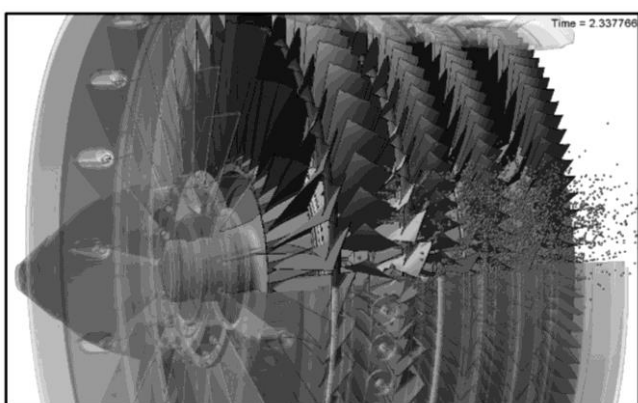


**Рис. 10.** Попадание средней птицы в корневое сечение на взлете  $H = 100$  м

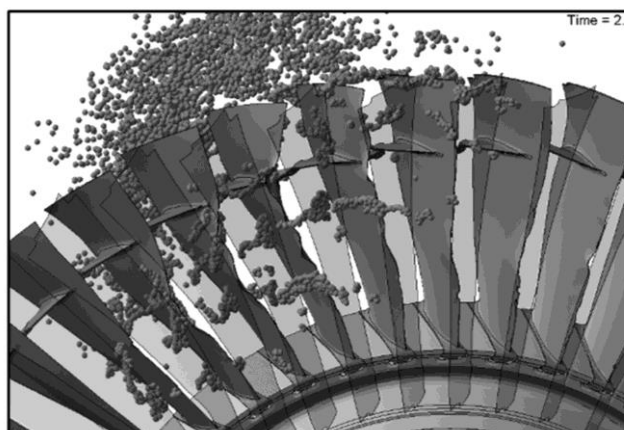
Два последних расчетных случая попадания птиц на режиме "малый газ" подтверждают предположение о том, что если в полете на низкооборотном режиме не было визуальной фиксации факта попадания птицы в двигатель, то, скорее всего, этот случай не попадает в статистику из-за отсутствия видимых изменений в работе двигателя.

Следующий расчетный случай: средняя птица массой 300 г забрасывается на взлете  $H = 100$  м на скорости 111 м/с в область корневого сечения рабочих лопаток. Длительность взаимодействия птицы с лопатками первой ступени составила около 1,5 мс. Были обнаружены погнутости входной кромки и повреждения с торцов на пяти рабочих лопатках первой ступени КНД (рис. 10).

Взаимодействие птицы с элементами проточной части КНД показано на рис. 11. С рабочим колесом второй ступени птица взаимодействует в интервале 1,2 – 2,9 мс. Когда основная масса птицы достигает второй ступени (около 1,5 мс), она попадает в среднюю и концевую области РЛ. В ходе взаимодействия птицы со второй ступенью рабочие лопатки задевают за направляющие аппараты первой ступени, в результате чего происходят локальные разрушения материала по входным кромкам нескольких рабочих лопаток (рис. 12).



**Рис. 11.** Взаимодействие средней птицы с проточной частью КНД при забросе в корневое сечение РЛ 1 ступени КНД на взлете  $H = 100$  м



**Рис. 12.** Попадание средней птицы в корневое сечение РЛ первой ступени КНД на взлете  $H = 100$  м

Частицы птицы в результате последовательного взаимодействия с рабочими лопатками первой и второй ступеней КНД приобретают окружную скорость, так что к моменту подлета к

третьей ступени основная масса птицы гарантированно уходит на периферию КНД. В результате чего птица не оказывает существенного воздействия на лопатки третьей и последующих ступеней. В этой связи с точки зрения птицестойкости широкохордные лопатки, которые обладают повышенной стойкостью при ударном воздействии посторонних предметов, рекомендуется применять именно для первых двух ступеней.

В ходе этого расчетного заброса была осуществлена оценка распределения массы птицы между наружным и внутренним контурами после прохождения КНД. На рис. 13 показаны использованные для этой цели "улавливатели" sph-частиц птицы. Масса птицы к 10 мс распределилась следующим образом: наружный контур – 180 г (60%); внутренний контур – 70 г (23%), остаток массы птицы на периферии КНД.

### Выводы

Проведена сравнительная оценка птицестойкости двигателя с изделием-прототипом. Повреждаемости определялись по результатам двух расчетных тестов на попадание мелкой птицы на вход в двигатель. Были получены качественно одинаковые картины деформирования и разрушений рабочих лопаток первой ступени КНД. На основании этого можно сделать вывод, что в диапазоне тестовых условий испытаний птицестойкость тестируемого двигателя находится на уровне своего прототипа.

Проводилась серия расчетных забросов мелких и средних птиц на вход в двигатель. Согласно оценке повреждений элементов проточной части КНД, полученных в ходе серии расчетных испытаний, выключения двигателя не требуется.

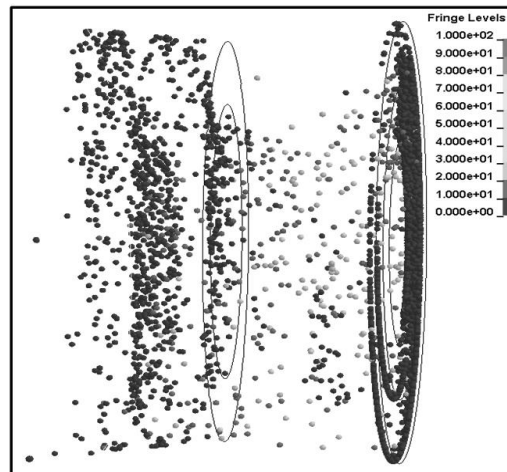


Рис. 13. Осевая скорость (м/с) частиц птицы в КНД на 10 мс

### ЛИТЕРАТУРА

1. James S. Wilbeck. *Impact Behavior of Low Strength Projectiles*. Air Force Materials Laboratory. 1977.
2. Lavoie M.-A., Gakwaya A., Nejad Ensan M., Zimcik D.G. *Validation of Available Approaches for Numerical Bird Strike Modeling Tools*. 2007.
3. Mhamed Souli. *Smooth Particle Hydrodynamics SPH Method in LS-DYNA*. STRELA. 2012.
4. Ls-Dyna. *Keyword user's manual*. Vol. I. Version 971 R6.1.0 Livermore Software Technology Corporation (LSTC). August 2012.
5. André Haufe. GISSMO – Material Modeling with a sophisticated Failure Criteria. *LS-Dyna Developer Forum*. 2011.
6. Ls-Dyna. *Keyword user's manual*. Vol. II. Material Models. Version 971 R6.1.0 Livermore Software Technology Corporation (LSTC). August 2012.
7. Кузьмин М.В., Кирсанов А.Р. Описание модели разрушения материала рабочих лопаток вентилятора // *Научный Вестник ГосНИИ ГА*. 2012. № 4. С. 62-67.

### PREDICTIVE ESTIMATION OF GAS-TURBINE ENGINE DAMAGEABILITY IN THE EVENT OF BIRDS INGRESSION INTO GAS-TURBINE ENGINE INLET

Kuzmin M.B., Kirsanov A.R.

This article provides results of birds throwing into gas turbine aeroengine computational simulation. Engine birdstrike capabilities are estimated on the basis of comparative analysis of the damage dealt to fan working blades during birds throw-in tests and the damages, which are resulted from estimative series of birds throwing-in.

**Keywords:** gas-turbine engine, birdstrike capacity, bird ingestion, vulnerability, destruction.

## REFERENCES

1. **James S. Wilbeck.** Impact Behavior of Low Strength Projectiles. Air Force Materials Laboratory. 1977.
2. **Lavoie M.-A., Gakwaya A., Nejad Ensan M., Zimcik D.G.** Validation of Available Approaches for Numerical Bird Strike Modeling Tools. 2007.
3. **Mhamed Souli.** Smooth Particle Hydrodynamics SPH Method in LS-DYNA. STRELA. 2012.
4. **LS-Dyna.** *Keyword user's manual*. Vol. I. Version 971 R6.1.0 Livermore Software Technology Corporation (LSTC). August 2012.
5. **André Haufe.** GISSMO – Material Modeling with a sophisticated Failure Criteria. *LS-Dyna Developer Forum*. 2011.
6. **LS-Dyna.** *Keyword user's manual*. Vol. II. Material Models. Version 971 R6.1.0 Livermore Software Technology Corporation (LSTC). August 2012.
7. **Kuzjmin M.V., Kirsanov A.R.** Описание модели разрушения материала рабочих лопаток вентилятора. *Научный вестник ГосНИИ ГА*. 2012. № 4. Pp. 62-67. (In Russian).

## Сведения об авторах

**Кузьмин Максим Владимирович**, 1978 г.р., окончил РГАТА (2000), заместитель главного конструктора ОКБ им. А. Люльки, автор 25 научных работ, область научных интересов – динамика и прочность ГТД, испытания и эксплуатация ГТД, численное моделирование.

**Кирсанов Андрей Родионович**, 1971 г.р., окончил СГАУ (1994), инженер отдела прочности ОКБ им. А. Люльки, автор 5 научных работ, область научных интересов – прочность, численное моделирование.