

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭРОЗИОННОГО ИЗНОСА ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА

© 2011 А. В. Гумеров<sup>1</sup>, Р. Г. Акмалетдинов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Открытое акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Мотор», г. Уфа  
<sup>2</sup>Уфимский государственный авиационный технический университет

Газотурбинные двигатели являются основным типом двигателей в гражданской и военной авиации, используются как маршевые и форсажные энергоустановки в судостроении, энергетике, газовой промышленности. Важнейшее требование к двигателям – высокая эксплуатационная надёжность. Моделирование процессов эрозионного износа с использованием современных программных комплексов открывает большие возможности прогнозирования недопустимых состояний ГТД в условиях эксплуатации, применение на этапе проектирования необходимых и достаточных способов защиты деталей проточной части от эрозионного износа.

*Компрессор ГТД, трёхмерная модель течения в компрессоре, предельное состояние, пылевая эрозия, двухфазный поток, модель эрозионного износа.*

**Введение**

Статья посвящена описанию картины и моделированию предельного эрозионного износа лопатки компрессора и явлений, происходящих в процессе эксплуатации газотурбинного двигателя в сильно запыленной атмосфере. Оценка текущего технического состояния авиационного ГТД в процессе эксплуатации и его предельных возможностей соответствует современным требованиям, предъявляемым к газотурбинным двигателям с целью повышения ресурса и поддержания высокого уровня эксплуатационной надёжности.

Прогнозирование текущих и критических (предотказных) состояний газотурбинных двигателей при эксплуатации в условиях запылённой атмосферы позволяет своевременно проводить мероприятия по техническому обслуживанию двигателя и системы очистки воздуха на входе. Понимание процессов газоабразивной эрозии элементов проточной части даёт возможность разрабатывать адекватные и достаточные методы и способы защиты деталей двигателя от эрозии (эрозионно стойкие покрытия, пылезащитные устройства и т.д.)

Существует потребность значительно, на порядки, увеличения ресурса конвертированных энергетических установок, включая наиболее полное использование потенциальных возможностей базовых авиационных двигателей. С другой стороны, в процессе реконверсии могут быть использованы решения, полученные на конвертированных двигателях путем исследований на них недопустимых и недоступных в авиации режимов и условий. Для малоразмерных ГТД вертолётного и танкового применения

остро стоит вопрос пылевой эрозии, поэтому, например, выполняется разработка программы специальных стендовых пылевых испытаний вертолётных двигателей ФГУП «ЦИАМ имени П.И. Баранова»

**Объект исследования**

Генератор сжатого воздуха (ГСВ) предназначен для эксплуатации в составе передвижной компрессорной установки ПКУ-30/0,8, используемой для продувки, очистки и сушки внутренних полостей магистральных газо- и нефтепроводов, а также для вытеснения воды после гидроиспытаний [1]. ГСВ разработан в ОАО «НПП «Мотор» на базе авиационного турбореактивного двигателя Р13-300. В ходе отработки опытной компрессорной установки исследуемый ГСВ эксплуатировался в условиях запыленной атмосферы, в климатических условиях типа полупустыни, то есть с повышенной концентрацией абразивных частиц в воздухе.

Работа в условиях запыленной атмосферы приводит к изменению характеристик установки по отношению к стендовым характеристикам.

Для исследования используются параметры  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $t_T$ ,  $P_K$  в приведенных величинах, полученные при работе ГСВ в запыленной атмосфере, по мере наработки. Сравнение этих точек с исходной дроссельной характеристикой позволяет получить отклонение параметров в процессе работы. Затем вычисляются значения относительных отклонений параметров  $\Delta n_2$ ,  $\Delta t_4$ ,  $\Delta P_K$  по мере наработки.

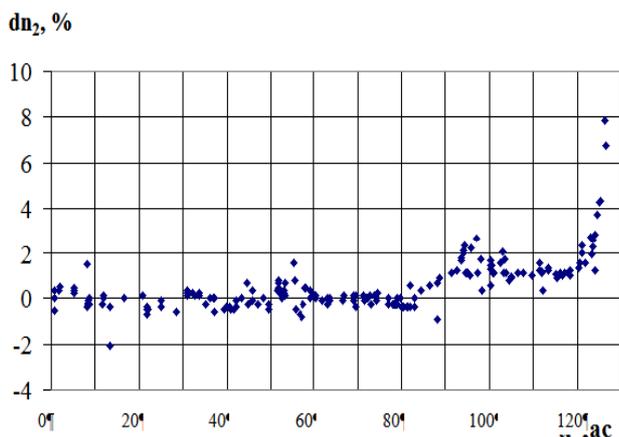


Рис. 1. Изменение относительного отклонения частоты вращения в процессе наработки

Наблюдаются два периода интенсивного изменения частоты вращения ротора высокого давления при неизменном режиме работы ГСВ: в пределах наработки 80...100 часов, и конечный участок при наработке больше 120 часов, последующее изменение происходит довольно резко. Стабилизация, вероятно, отражает работу в более-менее чистой (беспыльной) атмосфере. В конце работы установки ( $t > 120$  ч) произошли три помпажа, отмечено увеличение частоты вращения  $n_2$  на 7 %.

Поведение параметров  $n_2$  и  $t_T$  в функции наработки в определенной мере напоминает тенденции изменения их в процессе длительной (до 1000 ч) наработки базового двигателя на стенде и при эксплуатации на самолете.

### Состояние лопаток компрессора при эрозионном износе

При работе двигателя в условиях сильной запыленности атмосферы поступающая пыль оказывает эрозионное воздействие на лопатки компрессора и турбин, а также может осаждаться в виде твердого осадка на деталях горячей части двигателя.

На рис. 2 представлены последствия предельного эрозионного износа лопаток направляющего аппарата и рабочих лопаток КВД осевого компрессора.

Характер влияния запыленного воздуха на работу двигателя зависит от физико-химической природы пыли, ее дисперсного состава и концентрации пыли в общем объеме воздуха, засасываемого компрессором двигателя.

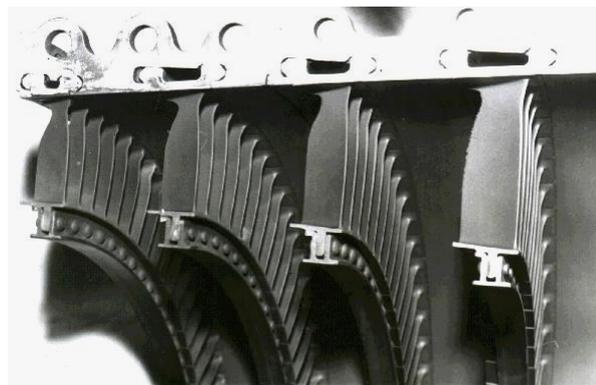


Рис. 2. Направляющий аппарат после длительной работы в условиях запылённой атмосферы [2]



Рис. 3. Характер предельного износа рабочих лопаток ГСВ по ступеням со 4 по 8 слева направо (наработка 128 часов)

Моделирование эрозионного износа предполагает наличие точной геометрической картины, привязанной к той же системе координат, что и для новой, неизношенной лопатки. Необходимо точно знать, каков износ со стороны входной и выходной кромки, со стороны корыта и спинки, какова закономерность изменения геометрических размеров по высоте пера лопатки.

В такой постановке используется бесконтактная система измерений геометрических параметров изделий сложной формы, применяемая в авиационном двигателестроении [3].

На рис. 4 и 5 графически представлены результаты измерений изношенной рабочей лопатки 6-й ступени в трёхмерном представлении и в сечении IV-IV.

Рабочие лопатки 3-8 ступеней имеют значительный износ в периферийной части, возрастающий по мере уменьшения размеров лопаток. Толщина входной и выходной кромок лопаток напоминала лезвие бритвы. На периферии последней ступени хорда уменьшилась практически до нуля (рис. 6, в). Износ лопаток направляющего аппарата имеет максимальную величину на некотором удалении от периферии.

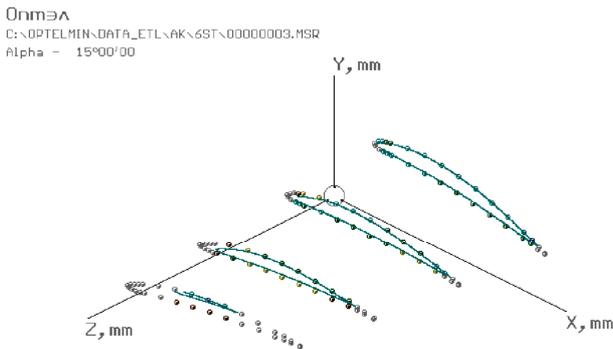


Рис. 4. Трёхмерное представление результатов измерений

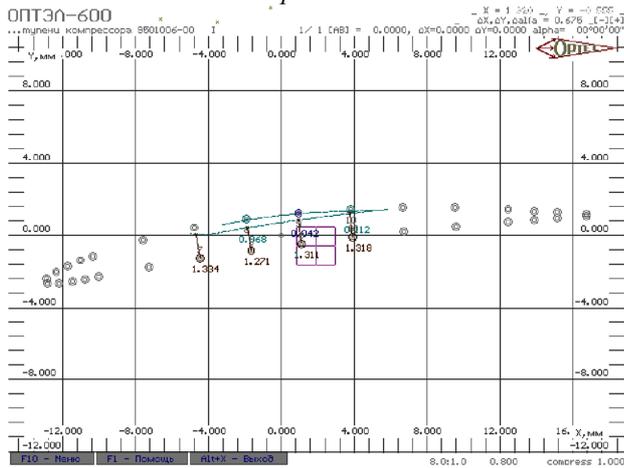


Рис. 5. Измерения в сечении IV-IV

Износ лопаток рабочего колеса и направляющего аппарата на периферии значительно больше, чем в корневом сечении лопаток. Характер данного вида износа объясняется наличием сепарирующего эффекта в компрессоре, когда концентрация абразивных частиц на периферии гораздо больше, чем в корневом сечении рабочих лопаток, так же как и относительная скорость потока. В направляющем аппарате в пристеночном слое уменьшается скорость воздуха (и частиц), поэтому эрозия меньше.

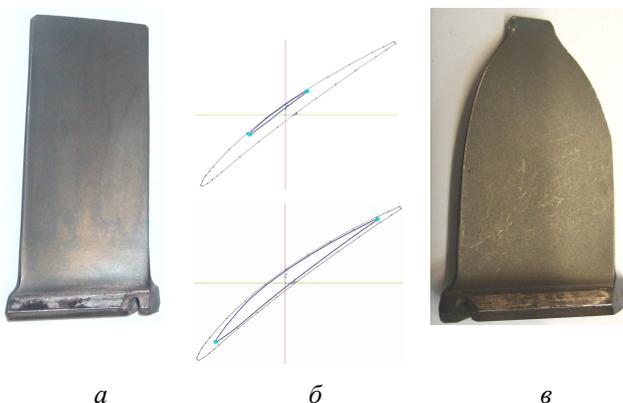


Рис. 6. Твердотельная модель по результатам измерений: а - новая лопатка 6-й ступени КВД; б - наложенные сечения в эскизе ПК Компас - 3D; в - лопатка, подвергшаяся критическому абразивному износу

По рабочим чертежам в CAD системе Компас-3D были построены трёхмерные твердотельные математические модели. В пространстве задавались поверхности, соответствующие плоским сечениям в чертеже. По данным таблицы с координатами точек спинки и корыта строились образующие спинки и корыта. С помощью булевой операции по сечениям получали перо лопатки. Кинематической протяжкой эскиза замка типа «ласточкин хвост» вдоль направляющей получали контур замковой части лопатки. На рис. 7,а дано трёхмерное представление пера лопатки.

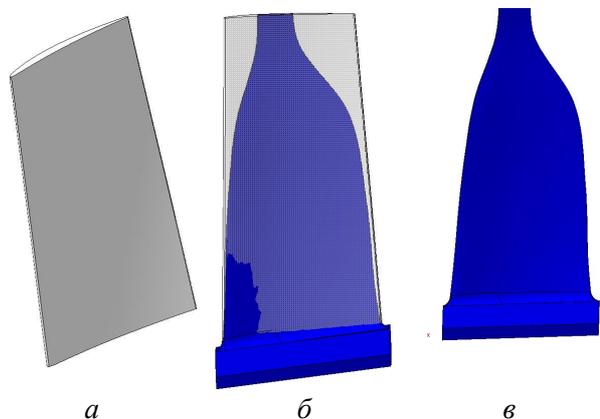


Рис. 7. Трёхмерное представление лопатки 6-й ступени КВД в системе Компас-3D: а - новое перо; б - результат наложения нового пера на изношенное; в - перо изношенной лопатки

Наложением моделей новой и изношенной лопатки (рис. 7,б) можно воспроизвести точную картину характера и степени износа пера лопатки. Современные методы и средства измерений в совокупности с CAD системами твердотельного моделирования позволяют проводить качественную адекватную оценку состояния деталей и узлов ГТД после эксплуатации в любой степени износа или деформации при любых факторах воздействия.

### Трёхмерная модель течения в изношенном компрессоре

Проведён трёхмерный газодинамический расчёт 5 ступенчатого компрессора высокого давления ГСВ, подвергнутого предельному эрозионному износу. Для получения расчётной области спроектированы трёхмерные твердотельные модели входного и выходного каналов, лопаточных вен-

цов рабочих колёс и направляющих аппаратов в САД системе Компас -3D.

Расчёт выполнен на режиме, моделирующем работу изношенного компрессора с применением программной среды DWIG:

- неизменна физическая частота вращения ротора;
- уменьшен расход воздуха на выходе из КНД;
- снижено давление за компрессором ВД.

Расчётная область представлена двенадцатью «жидкими» доменами (fluid domain), сетка состоит из элементов типа гексаэдр.

На рис. 8 - 10 представлена визуализация полей давления, температуры, скорости в межлопаточных каналах.

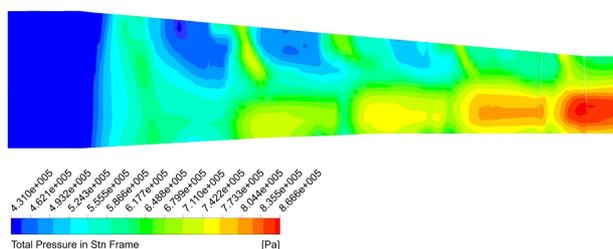


Рис. 8. Поле давления заторможенного потока в меридиональном сечении

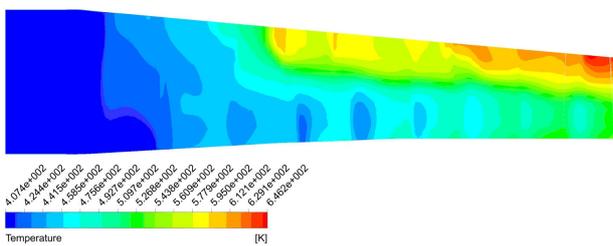


Рис. 9. Поле температуры в меридиональном сечении

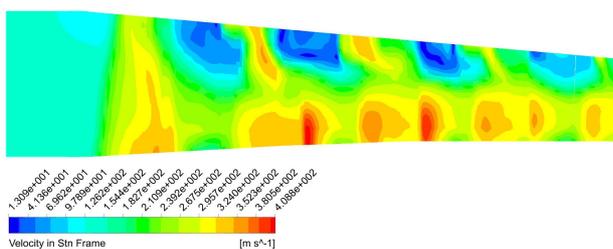


Рис.10. Поле абсолютной скорости потока в меридиональном сечении

Полученная в результате моделирования картина течения в компрессоре высокого давления свидетельствует о наличии вихревых и обратных токов, когда сжатый в корневой части ступени воздух перетекает на вход в ступень. Режим течения в компрессоре высокого давления не может даже классифицироваться, как срывной, это течение с установившимися вихревыми и обрат-

ными потоками в периферийной части, где изношенные лопатки могут только повышать температуру, не повышая давления. Температура на периферии даже средних ступеней выше, чем за компрессором в корневой части лопаток.

В заданных краевых условиях режим работы компрессора можно считать запредельным, так как падение степени повышения давления превышает оценку снижения в системе генератора сжатого воздуха, выполненную в ПК DVIG. Работу такого каскада высокого давления можно представить только в комплексе с компрессором низкого давления, берущим на себя большую долю сжатия и всю транспортировку (расход) воздуха.

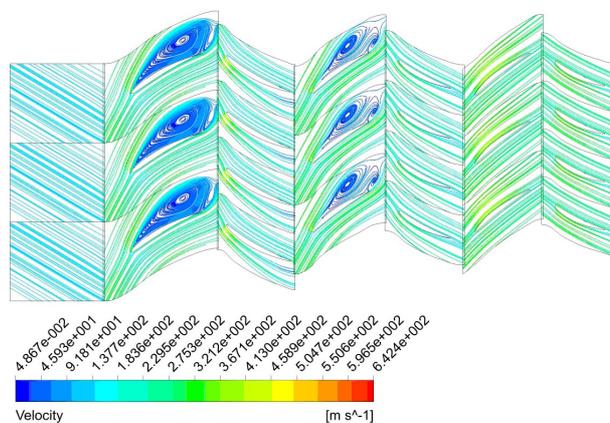


Рис. 11. Относительная скорость потока на высоте 50% (span 0,5) в линиях тока

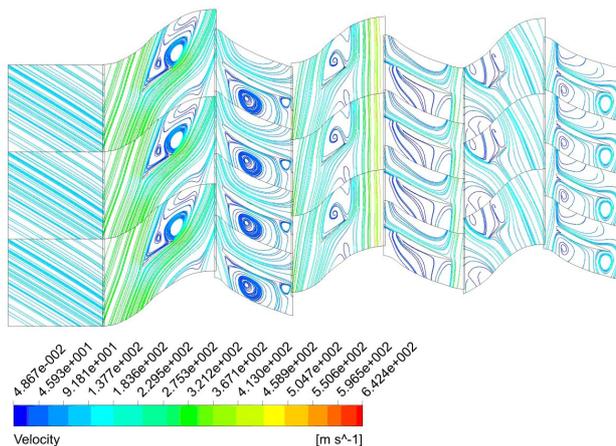


Рис. 12. Относительная скорость потока на высоте 90% (span 0,9) в линиях тока

### Моделирование двухфазных потоков

Моделирование течения запылённого воздуха производится с использованием ПК ANSYS-CFX, где сохраняются основополагающие уравнения течения однофазного потока и базовый решатель.

В многокомпонентном многофазном потоке (далее многофазном) уравнения движения для компонентов  $Y_{A\alpha}$  приняты подобными для однофазного потока:

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\alpha Y_{A\alpha}) + \nabla \cdot (r_\alpha (\rho_\alpha U_\alpha Y_{A\alpha} - \rho_\alpha D_{A\alpha} (\nabla Y_{A\alpha}))) = S_{A\alpha}$$

Коэффициенты молекулярной диффузии даны как  $\rho_\alpha D_{A\alpha}$ , где  $D_{A\alpha}$  - это кинематический коэффициент диффузии.

Начальные условия в многофазном потоке задаются так же, как для основной (несущей) жидкости [4].

ANSYS CFX обеспечивает широкий диапазон физических моделей для сил, действующих на многофазный поток:

- 1) межфазовое трение;
- 2) подъемная сила;
- 3) действительная массовая сила;
- 4) сила трения при скольжении по стенке;
- 5) турбулентные дисперсионные силы.

Для упрощённого расчёта двухфазных течений с целью определения концентраций и скоростей движения твёрдых частиц задаются осреднённые характеристики потока:

- концентрация и фракционный состав пыли;
- средняя по проточной части всего компрессора окружная скорость;
- средняя по проточной части всего компрессора осевая скорость;
- радиус кривизны и высота канала.

Параметры на входе и геометрические размеры расчётной области для моделирования течения двухфазного потока принимались, как для четвертой ступени. Расчётная схема – участок кольцевого канала с обособленными зонами для входа и выхода потока. Протяжённость канала по средней линии равна пути двухфазного потока по окружности во время нахождения его в проточной части компрессора. Осреднённая окружная скорость составляет 113 м/с, осреднённая осевая скорость – 196 м/с. Длина проточной части – 0,7м, время пребывания выделенной частицы в канале составляет  $0,7/196=0,0036$ с. При заданной окружной скорости и среднем диаметре равном 0,563м протяжённость дуги, на которой происходит

сепарация пыли, составляет  $0,0036 \cdot 113 = 0,4$ м.

При течении в канале пылевых частиц различной крупности наиболее мелкие частицы под воздействием вязких сил примерно следуют за потоком, изнашивая стенки канала по механизму истирания. Более крупные частицы, размером свыше 15 мкм, движутся в большей части под воздействием инерционных сил, ударяются о стенки канала в соответствии с направлением их скорости, вызывая ударную эрозию (механизм микрорезания) (рис. 13).

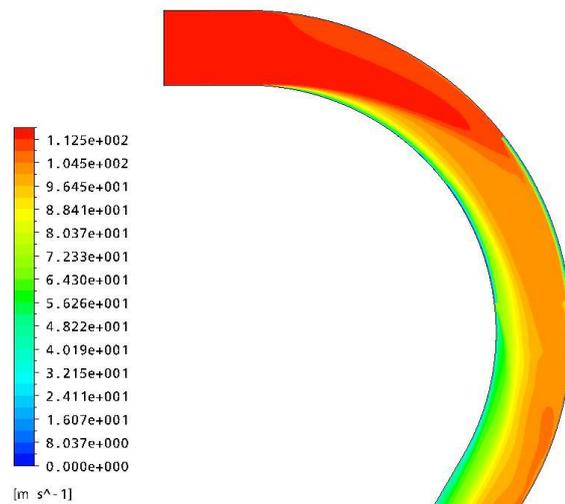


Рис. 13. Движение в изогнутом канале частиц с характерным диаметром 20 мкм

Форма пылевой частицы также влияет на направление и величину скорости движения частицы в канале. Частицы неправильной формы (множество острых граней) при движении несут с собой большой объём «присоединённого» воздуха. Частица с большим объёмом «присоединённого» воздуха движется под преимущественным воздействием сил вязкого трения, вместе с потоком, рис. 14 (аналогично движению однофазного потока в криволинейном канале):

- сепарация частиц пыли происходит, в основном на дуге, соответствующей перемещению в трёх ступенях компрессора;
- на концентрацию пылевых частиц в потоке влияет их взаимодействие со стенками (упругий отскок  $restitition\ coefficient = 0.8$ ), что приводит к неравномерному (волнообразному) изменению концентрации по длине проточной части;

- выявлено изменение (уменьшение) скорости пылевых частиц в пограничном слое вдоль стенок проточной части, что необходимо при объяснении износа лопаток в пристеночном слое;

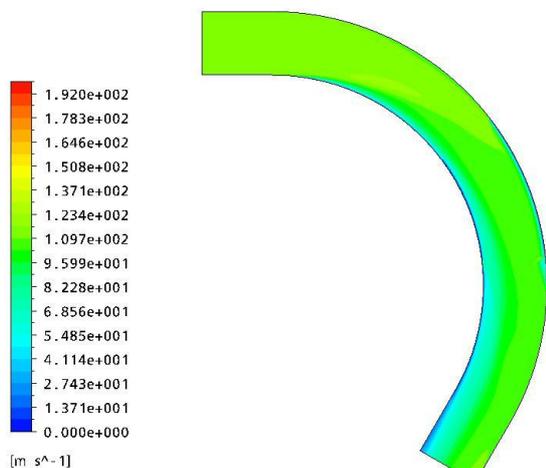


Рис. 14. Движение в изогнутом канале частиц с характерным диаметром 20 мкм и присоединённым объёмом 10

- установлено, что характер потока в конце проточной части носит установившийся характер, концентрация пылевых частиц вдоль наружной стенки значительно не изменяется;

- влияние плавучести и силы земного тяготения на траекторию движения частиц не выявлено ввиду их малости по сравнению с инерционными и газовыми силами в системе.

Программный комплекс ANSYS-CFX при расчёте эрозионного изнашивания использует теорию Табакова – Гранта (Tabakof and Grant) [5]. В эрозионной модели Табакова – Гранта величина эрозии  $E$  определяется следующей зависимостью:

$$E = k_1 \cdot f(\gamma) V_p^2 \cos^2 \gamma [1 - R_T] + f(V_{PN}),$$

где

$$f(\gamma) = \left[ 1 + k_2 \cdot k_{12} \sin \left( \gamma \frac{\pi/2}{\gamma_0} \right) \right];$$

$$R_T = 1 - k_4 \cdot V_p \sin \gamma;$$

$$f(V_{PN}) = k_3 (V_p \sin \gamma)^4;$$

$$k_2 = 1 \text{ если } \gamma \leq 2\gamma_0;$$

$$k_2 = 0 \text{ если } \gamma \geq 2\gamma_0;$$

$E$ - масса материала, унесённого абразивными частицами;

$V_p$  – скорость движения абразивных частиц;

$\gamma$ - угол столкновения в радианах между траекторией движения частицы и стенкой;

$\gamma_0$ . начальный угол, при котором эрозионный унос массы максимален;

$k_1$ - $k_4$ ,  $k_{12}$  и  $\gamma_0$  - константы, зависящие от пары материалов частица-стенка.

Моделирование эрозионного износа лопаток компрессора в среде ANSYS-CFX позволило спланировать эксперимент. На базе ОАО «НПП «Мотор» по созданной методике проведены усталостные, эрозионные и коррозионные испытания рабочих лопаток ротора компрессора низкого давления Р95Ш [6]. Лопатки отремонтированы по серийной технологии до виброгалтовки с последующим нанесением покрытия на перо на основе нитрида-титана TiN- Ti<sub>2</sub>N

### Выводы

На конвертированном авиационном ГТД в условиях, недоступных и недопустимых при эксплуатации на летательном аппарате, получен в состоянии предельного эрозионного износа режим, характеризующийся потерей газодинамической устойчивости на стационарном режиме. Газодинамическим признаком явления служит увеличение частоты вращения ротора высокого давления двухвального ГТД на ~7%.

С использованием современных оптико-электронных средств измерения получены геометрические размеры лопаток компрессора, достигшего предельного состояния. Размеры получены с привязкой к единой конструкторской технологической базе, что позволяет сравнивать все геометрические размеры новой и изношенной лопатки в любой точке профиля. Трёхмерные твердотельные модели являются основой для создания расчётных областей трёхмерных газодинамических моделей компрессора.

На основе универсальной математической модели течения двухфазного потока в упрощенной модели канала компрессора исследованы факторы, определяющие сепарацию пыли:

- по размерам частиц от 5 до 20 мкм;
- по форме пылевых частиц.

Выполнены экспериментальные исследования эрозионной устойчивости лопаток компрессора с различными видами покры-

тий с использованием методических положений проведенной исследовательской работы.

### Библиографический список

1. Программа стендовых испытаний опытного образца генератора сжатого воздуха ГСВ [Текст] / Р.З. Хамитов, С.А. Струговец, А.А. Рыжов [и др.] // Технич. отчет 95пм – 35 НПП «Мотор», 1990.

2. Разработка опытно-промышленного образца генератора сжатого воздуха компрессорной установки [Текст] / Р.З. Хамитов, А.А. Рыжов В.С. Дьяконов [и др.] // Технический отчет ВФ ВНИИСТ и НПО «Мотор», Уфа, 1989. –10с.

3. Компьютерные лазерно-электронные комплексы измерения геометрии изделий сложной формы «ОПТЭЛ» [Текст] / Р.М. Галиуллин, Р.М. Галиуллин, Ж.М. Бакиров [и др.] // Авиационная техника. Известия вузов. 1997. - №1. - С. 100-106.

4. Технический акт по результатам разборки и осмотра изделия Т-3 после испытаний в условиях Средней Азии [Текст]- Челябинск, 1982.- 48 с.

5. ANSYS CFX, Release 11.0-Solver Theory Guide.

6. Результаты исследования покрытий лопатки компрессора 2 ступени 9501002-03 на основе нитрид-титана. [Текст]: Техническая справка 95ДС-214 НПП «Мотор».- 2009.

## COMPRESSOR BLADE EROSION MODELING

© 2011 A. V. Gumerov<sup>1</sup>, R. G. Akmaletdinov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Joint-stock company «Scientific-and-production enterprise «Motor», Ufa

<sup>2</sup>Ufa state aviation technical university

Jet engines are the basic type of engines in a civil and military aviation, used as main and forcings energy plant is in shipbuilding, energy, gas industry. A major requirement to the engines is high operating reliability. The design of processes of erosion by modern numerical complexes give new benefits for prognostication of the impermissible states of JE in exploitation, to apply on the stage of planning necessary and sufficient methods to protect engine details from erosion.

*Compressor of GTD, 3D flow in compressor, maximum state, dust erosion, multiphase flows, erosion modeling.*

### Информация об авторах

**Гумеров Александр Витальевич**, инженер-конструктор 1 категории, руководитель направления «ротор компрессора» в конструкторской бригаде ОАО «Научно – производственное предприятие «Мотор», г.Уфа. Тел.: 937-305-76-16. E-mail: [fallenwarrior@yandex.ru](mailto:fallenwarrior@yandex.ru). Область научных интересов: конструкция турбомашин и механика потоков в турбомашинах.

**Акмалетдинов Рафил Газитдинович**, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электромеханики Уфимского государственного авиационного технического университета. Тел.: 791-453-94-93. E-mail: [akmar51@inbox.ru](mailto:akmar51@inbox.ru). Область научных интересов: авиадвигателестроение, пылевая и капельная эрозия, эксплуатация двигателей.

**Gumerov Alexander Vitalevich**, 1<sup>st</sup> category designer, head of rotor of compressor designers team in <sup>1</sup>Joint-stock company «Scientific-and-production enterprise «Motor», Ufa. Phone: +7-937-305-76-16. E- mail: [fallenwarrior@yandex.ru](mailto:fallenwarrior@yandex.ru). Area of research: jet engine construction and mechanic of streams in jet engine.

**Akmaletdinov Rafil Gazitdinovich**, candidate of technical sciences, head lecturer of electromechanics cathedra of Ufa state aviation technical university. Phone: +7-91-453-94-93. E- mail: [akmar51@inbox.ru](mailto:akmar51@inbox.ru). Area of research: erosion, exploitations factors, jet engine construction.