
Моделирование эрозионного износа композиционных материалов от воздействия абразивных частиц в проточной части газотурбинных двигателей

Д.В. Афанасьев, С.В. Воробьев, Д.В. Матюхин
ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва

В работе рассмотрено влияние абразивных частиц различной природы, способных вызывать эрозионный износ в проточной части газотурбинных двигателей. Проведен анализ стандартных методов испытаний и экспериментального оборудования, предназначенного для исследования газоабразивного изнашивания. Предложены новые конструкции установок со сверхзвуковым соплом и комбинированная. Комбинированная установка позволяет имитировать вращение рабочих лопаток с одновременным регулированием скорости потока газа, что больше приближает условия испытаний к реальным условиям эксплуатации.

Modeling of erosive wear of composite materials from the impact of abrasive particles in the flow part of gas turbine engines

D.V. Afanasyev, S.V. Vorobev, D.V. Matykhin
CIAM, Moscow, Russia

The paper considers the influence of abrasive particles of various nature that can cause erosive wear in the flow part of gas turbine engines. The analysis of standard test methods and experimental equipment designed for the study of gas-abrasive wear is carried out. New designs of installations with a supersonic nozzle and a combined one are proposed. The combined installation allows you to simulate the rotation of the working blades with simultaneous regulation of the gas flow rate, which brings the test conditions closer to real operating conditions more accurately.

1. Введение

Эрозионный износ деталей, находящихся в проточной части газотурбинных двигателей (ГТД), вызывается

воздействием абразивных частиц (АЧ), которые могут различаться по составу, концентрации, твердости, размерам и по форме. Попадание частиц в двигатель может происходить на всех высотах эксплуатации

воздушного судна (ВС). Оценка условий возникновения на территории аэродромов пыльных и песчаных бурь, а также их влияние на работу ВС рассмотрены в работах [1; 2]. Согласно статистическим данным, приведенным в [3], полет ВС в облаке вулканического пепла является большой редкостью, но тем не менее проблеме безопасности полетов при извержениях вулканов уделяется большое внимание во всем мире. Это объясняется тем, что с ростом интенсивности воздушных перевозок все чаще случаются инциденты с самолетами, попавшими в облака вулканического пепла. Верхняя часть грибообразного облака пепла, или «зонтичная область» колонны вулканического пепла, распространяются вначале радиально, а затем под влиянием ветра перемещается преимущественно в одном или нескольких конкретных направлениях, причем в различных слоях атмосферы. Такой процесс вызывает загрязнение огромных объемов воздушного пространства на высотах до 14 км, которые используются как стандартные эшелоны крейсерского полета реактивных самолетов. Кроме того, существует вероятность образования облаков ресуспендированного пепла [4], возникающих под воздействием сильного ветра на склонах вулканов, и затем тоже распространяющихся на значительные расстояния.

При проведении сертификационных испытаний двигателей необходимо имитировать условия воздействия на их узлы и агрегаты абразивных частиц максимально точно. Есть возможность проводить испытания отдельных узлов двигателя, например газогенератора ПД-14, на высотных стендах [5]. Однако испытания ГТД размерностью типа ПД-14 и выше технически осуществимы только на наземных стендах без имитации скорости ($M=0$) и высоты ($H=0$ км). В этом случае условия воздействия посторонних частиц на рабочие лопадки вентилятора и другие элементы ГТД не будут воспроизводить полетные. Кроме того, такие испытания трудоемки и характеризуются высокой стоимостью. Их целесообразно проводить только на завершающем этапе сертификации.

В данной работе рассматриваются малогабаритные установки, которые позволяют близко к реальности воспроизводить условия воздействия АЧ на образцы материалов, покрытий и на конструктивно-подобные элементы (КПЭ).

2. Стандартные методики определения газоабразивного износа

В настоящее время стандартными методиками оценки эрозионной стойкости материалов и покрытий являются испытания с помощью центробежного

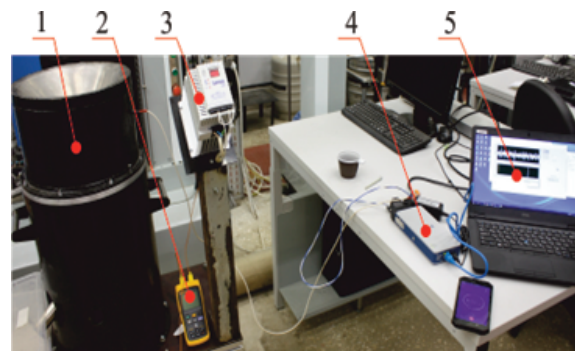


Рис. 1. Эрозионная центробежная установка
1 – бункер для загрузки АЧ; 2 – цифровой термометр;
3 – блок управления двигателем; 4 – измерительный модуль; 5 – ноутбук для контроля и поддержания частоты вращения ротора

ускорителя [6] или создание ударной струи твердых частиц потоком сжатого газа в пневматической эрозионной установке (ПЭУ) [7]. Центробежный ускоритель [7] предусматривает проведение испытаний на скоростях 36 м/с и 72 м/с с применением кварцевого песка фракцией 500...900 мкм и не предназначен для использования более мелких частиц, например вулканического пепла. В ПЭУ, рассмотренной в методике [3], в качестве АЧ применяется корунд (Al_2O_3), а испытания проводятся с дозвуковым соплом на скоростях частиц 30 м/с и 62 м/с. Данные методики не позволяют полностью соответствовать натурным условиям эксплуатации в части обеспечения высоких скоростей соударения или использования абразивных частиц иных фракций.

3. Обзор эрозионных установок

В ЦИАМ изготовлена установка с центробежным ускорителем с учетом стандартных требований [6]. Данная установка позволяет испытывать плоские образцы при заданных скоростях и размерах АЧ под разными углами атаки. В рамках одного эксперимента воздействию частиц подвергается как вновь исследуемый материал, так и образец из материала, принятого за эталон. Результат оценивают методом сравнения их степени износа. На рис. 1 представлен вид эрозионной установки после ее модернизации, в процессе которой была увеличена частота вращения ротора до 18 000 об/мин. Это позволило проводить испытания при скорости полета частиц в два раза превышающие рекомендованные стандартом [6]. С целью предотвращения перегрева контроль температуры корпуса двигателя осуществляется при помощи цифрового термометра. Блок управления двигателем позволяет изменять направление вращения ротора и поддерживать частоту вращения с высокой

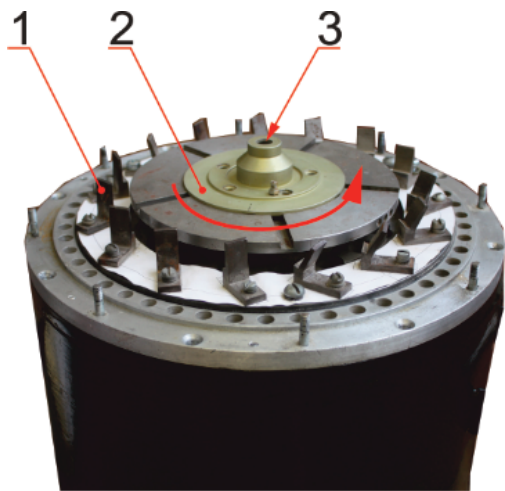


Рис. 2. Эрозионная центробежная установка без бункера для загрузки АЧ:
1 – держатели образцов; 2 – ротор центробежного ускорителя; 3 – отверстие для подачи АЧ из бункера

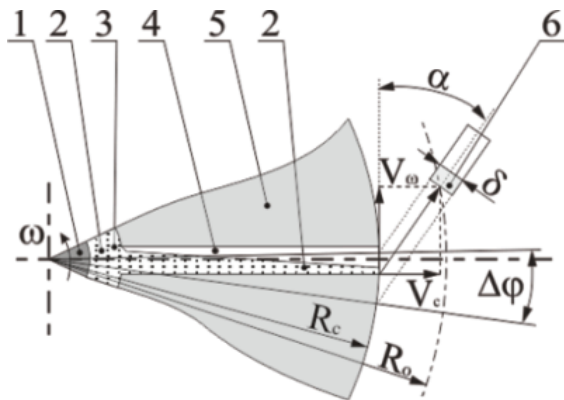


Рис. 3. Схема (вид сверху) движения АЧ в эрозионной установке:
1 – центральное тело; 2 – АЧ; 3 – кольцевой канал; 4 – радиальный канал; 5 – ротор; 6 – поверхность образца

точностью. Частота вращения определяется с помощью измерительного модуля. Параметры управления и сигналы контрольных датчиков передаются и отображаются на ноутбуке.

Установка позволяет размещать до пятнадцати образцов в держателях (рис. 2), отклоняющихся под углами 15; 30; 60 и 90° относительно вертикальной оси вращения ускорителя. АЧ поступают в ротор центробежного ускорителя из бункера через центральное отверстие и, ускоряясь в радиальных каналах ротора под действием центробежной силы, вылетают из них к образцам по баллистической траектории.

На рис. 3 представлена схема (вид сверху) движения АЧ в эрозионной установке. С помощью центрального тела под действием центробежных сил абразивные частицы из бункера распределяются по

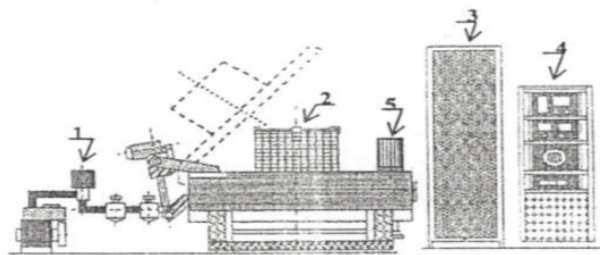


Рис. 4. Схема установок ЛЦС-5 и ЦС-871:
1 – система вакуумирования; 2 – рабочая камера; 3 – электропривод; 4 – пульт управления; 5 – дозатор частиц

кольцевому и пяти радиальным каналам внутри ротора. При этом кольцевой канал заполняется частицами полностью, а в радиальных их концентрация падает, так как частицы разгоняются и прижимаются к стенке канала, противоположной направлению вращения. Вылетая из ротора, АЧ ударяют по поверхности образца, установленного под углом α относительно направления касательного к ротору вектора.

В ВИАМ применяют центробежные установки ЛЦС-5 и ЦС-871 другого типа (рис. 4), обеспечивающие скорости частиц 50...300 м/с. В отличие от стандартной методики [6], принцип действия этих установок основан на вращении образцов относительно оси и соударением с потоком свободно падающих АЧ, подаваемых в рабочую камеру через дозирующее устройство. Рабочая камера вакуумируется, поэтому в эксперименте отсутствует воздействие воздуха на образцы.

Скорость соударения и угол атаки, которые должны имитироваться в ходе экспериментов по эрозии, зависят от геометрии элементов конструкции, режимов работы ГТД и условий полета воздушного судна (ВС). На взлетном режиме двигатель работает на повышенной частоте вращения, индуцируя большие окружные скорости полета АЧ, усиливающие эрозионный износ. Использование большинства систем реверса тяги в момент посадки и торможения поднимает со взлетно-посадочной полосы пыль и абразивные частицы крупного размера. Для имитации воздействия АЧ такого рода целесообразно



Рис. 5. ПЭУ со сверхзвуковым соплом:
1 – весы; 2 – компрессор; 3 – ресивер; 4 – манометр; 5 – пылезащитная камера; 6 – исследуемый образец; 7 – сверхзвуковое сопло

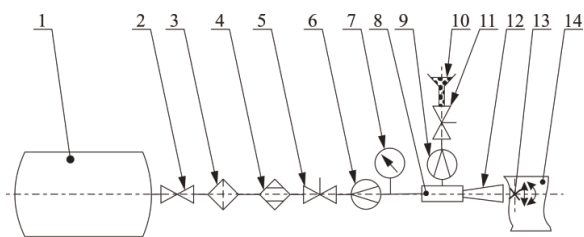


Рис. 6. Схема ПЭУ со сверхзвуковым соплом (ЦИАМ):
 1 – источник сжатого воздуха; 2 – отсечной клапан;
 3 – магистральный фильтр; 4 – осушитель; 5 – регулятор давления; 6 – система измерения расхода воздуха;
 7 – манометр; 8 – камера смешения; 8 – АЧ; 9 – система измерения расхода АЧ; 10 – бункер с АЧ; 11 – регулятор расхода АЧ; 12 – сверхзвуковое сопло; 13 – область воздействия АЧ; 14 – исследуемый объект

использовать установку, которая позволяет проводить исследования на скорости 36...110 м/с, варьируя размеры частиц в диапазоне 0,4...1,2 мм. На крейсерском режиме полета на высоте 11 км и с $M = 0,8$ для двигателя ПД-14 максимальная скорость столкновения АЧ с поверхностью рабочих лопаток вентилятора выше 300 м/с. Для установок ВИАМ типа ЛЦС-5, ЦС-871 [8] и стандартных методик [6; 7] предусматривают более низкую скорость. Однако скорость столкновения АЧ с преградой является наиболее важным фактором процесса износа. В работах [9; 10] показано, что относительный износ возрастает пропорционально скорости соударения с АЧ и подчиняется степенному закону. При этом показатель степени может находиться в диапазоне 2...3.

Высокую скорость соударения возможно создавать ПЭУ со сверхзвуковым соплом (рис. 5). Стойкость материалов к эрозионному износу оценивается по

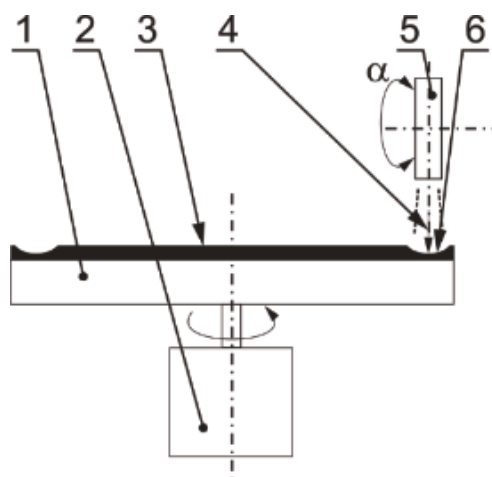


Рис. 7. Схема комбинированной эрозионной установки (ЦИАМ):

1 – ротор; 2 – двигатель; 3 – исследуемый материал или покрытие; 4 – струя газа с АЧ; 5 – сопло;
 6 – выработка от эрозионного износа

параметрам абсолютной или удельной потери массы образцов в результате эксперимента. Образцы взвешиваются на весах до и после испытания. Компрессором в ресивере создается избыточное давление, контролируемое манометром. В пылезащитной камере устанавливается образец, на который воздействует воздушный поток с частицами АМ, истекающий из сопла.

На рис. 6 представлена схема ПЭУ. Воздух от источника сжатого газа через отсечной клапан проходит через магистральный фильтр и осушитель. Давление задают регулятором давления, а расход определяют расходомером. Манометр размещен перед блоком камеры смешения. При помощи расходомера определяют количество АЧ, поступающее из бункера, а расход регулируют при помощи регулятора. В камере смешения АЧ, за счет эжекции, захватываются потоком сжатого воздуха и ускоряются в сверхзвуковом сопле. Исследуемый объект устанавливают в зоне воздействия под необходимым углом атаки. В качестве объекта могут быть использованы плоские образцы, КПЭ или полноразмерные изделия.

Перспективной разработкой является установка, предлагаемая авторами данной статьи. Ее схема представлена на рис. 7. На ротор, который вращается с заданной частотой, крепится образец из исследуемого материала, имеющий форму плоского диска. Поток АЧ истекает из сопла. Угол атаки зависит от сложения окружной скорости вращения и скорости потока воздуха в зоне обдува и регулируется наклоном сопла под расчетным углом α . Оценку износа определяют по глубине выработки.

Эрозионная установка предложенной конструкции позволяет имитировать вращение рабочих лопаток и обеспечивать воздействие на них абразивных частиц, летящих в высокоскоростном потоке воздуха. Оба параметра эксперимента регулируются независимо. Возможен дополнительный проточный подогрев струи воздуха. Такая схема проведения эксперимента позволяет воспроизводить условия соударения АЧ и узлов двигателя наиболее приближенно к полетным условиям, при этом используя частицы необходимых фракций.

4. Заключение

Рассмотрены наиболее распространенные источники пыли. Кроме песчаных бурь и вулканического пепла, образующегося при извержении, опасность также представляет ресуспендированный пепел. Отмечено, что стандартные методики испытаний на эрозионную стойкость имеют ограничения по размерам и скорости соударения частиц с объектами испытания, и не могут

полностью обеспечить имитацию условий эксплуатации современной авиационной техники. Проведен анализ конструкций эрозионных установок центробежного и пневматического типа. Представлена схема комбинированной установки, которая, по мнению авторов, является наиболее перспективной.

Список использованных источников

- [1] Влияние пыльных и песчаных бурь на работу авиационного транспорта и оценка условий их возникновения на аэродромах европейской части России / А.Р. Иванова, Е.Н. Скриптунова, Н.И. Комасько, А.А. Завьялова // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 4 (378). С. 78–95. DOI 10.37162/2618-9631-2020-4-78-95.
- [2] Эпизоды пыльных бурь на аэродромах азиатской части Российской Федерации / А.Р. Иванова, Е.Н. Скриптунова, Н.И. Комасько, А.А. Завьялова // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 2 (380). С. 20–42. DOI: 10.37162/2618-9631-2021-2-20-42.
- [3] Руководство по облакам вулканического пепла, радиоактивных материалов и токсических химических веществ / Международная организация гражданской авиации. Изд. 3-е. 2015. Doc 9691, AN/954.
- [4] Ресуспендированный пепел вулкана Шивелуч / О.А. Гирина, А.А. Сорокин, Д.В. Мельников, А.Г. Маневич, Ю.С. Крашенинникова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 5. С. 315–319. DOI 10.21046/2070-7401-2016-13-5-315-319.
- [5] Исследование устойчивости авиационного двигателя ПД-14 к воздействию вулканического пепла / А.А. Иноземцев, Л.С. Рысин, А.В. Челомбитько и др. // Вестник УГАТУ. 2022. Т. 26, № 2 (96). С. 60–70. DOI 10.54708/19926502_2022_2629660.
- [6] ГОСТ 23.201-84. Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытания материалов и покрытий на газоабразивное изнашивание с помощью центробежного ускорителя.
- [7] ASTM G76-18. Standard test method for conducting erosion tests by solid particle impingement using gas jets. 2018. 6 p.
- [8] Эрозионная стойкость композиционных материалов на основе клеевых препрегов при варьировании параметров испытания / А.Н. Боркова, Л.И. Помахаева, В.П. Помахаев, Л.А. Дементьева // клеи, герметики и технологии. 2007. № 3.
- [9] Finnie I., Wolak J., Kabel Y. Erosion of metals by solid particles // J. Mater. 1967. Vol. 2. P. 682–700.
- [10] Sheldon G.L., Kanhere A. An investigation of impingement using single particles // Wear. 1972. Vol. 21. P. 195–208.