

ANALYS OF PD-14 AIRCRAFT ENGINE RESISTANCE TO THE VOLCANIC ASH IMPACT

A. A. Inozemtsev ^{1a}, D. D. Popova ^{1,2b}, T. V. Abramchuk ^{1a}, O. A. Girina ^{4d}, L. S. Rysin ^{3c},
S. V. Kuptsov ^{3c}, A. N. Sazhenkov ^{1a}, S. I. Sendyurev ^{1a}, A. V. Chelombitko ^{3c},
M. D. Gallyamov ^{1a}, A. V. Dvinskikh ^{1a}

¹ JSC "UEC-Aviadvigatel"

² Perm National Research Polytechnic University

³ Central Institute of Aviation Motors

⁴ Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS

^a office@avid.ru, ^b popova-dd@avid.ru, ^c avim@ciam.ru, ^d girina@kscnet.ru

Submitted 2022, June 17

Abstract. The PD14 type Russian aircraft engine test results when volcanic ash enters its gas-air path are presented for the first time. Tests of PD-14 developed by JSC "UEC-Aviadvigatel" [1] were carried out in the conditions of a closed ground test bench Ts-17T FAA "CIAM named after P. I. Baranov" in accordance with the requirements of the European Aviation Safety Agency EASA. Natural ash from modern eruptions of the Kamchatka volcano Shiveluch was used as volcanic ash. It is shown that the ash ingress into the PD-14 engine with the maximum permissible concentration in Europe of 4 mg/m³ for one hour does not lead to a change in the traction characteristics of the PD-14 and the occurrence of undesirable consequences. Particular attention is paid to the effect of volcanic ash on the combustion chamber and engine turbine. The data of X-ray spectral analysis of vitreous ash deposits on turbine elements are presented. Numerical calculation of the model area of generation of vitreous deposits of Shiveluch ash in the gas-air path of the PD-14 engine was carried out.

Keywords: volcanic ash; aircraft gas turbine engine; combustion chamber; turbine; turbine nozzle blades; vitreous deposits; andesite; X-ray spectral analysis.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПД-14 К ВОЗДЕЙСТВИЮ ВУЛКАНИЧЕСКОГО ПЕПЛА

А. А. Иноземцев ^{1а}, Д. Д. Попова ^{1,2б}, Т. В. Абрамчук ^{1а}, О. А. Гирина ^{4г},
Л. С. Рысин ^{3в}, С. В. Купцов ^{3в}, А. Н. Саженов ^{1а}, С. И. Сендюрев ^{1а},
А. В. Челомбитко ^{3в}, М. Д. Галлямов ^{1а}, А. В. Двинских ^{1а}

¹ АО «ОДК-Авиадвигатель»

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет

³ Центральный институт авиационного моторостроения имени П. И. Баранова (ЦИАМ им. П. И. Баранова)

⁴ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

^a office@avid.ru, ^b popova-dd@avid.ru, ^c avim@ciam.ru, ^d girina@kscnet.ru

Поступила в редакцию 17.06.2022

Аннотация. Впервые представлены результаты испытаний российского авиационного двигателя типа ПД-14 при попадании в его газоздушный тракт вулканического пепла. Испытания ПД-14 разработки АО «ОДК-Авиадвигатель» [1] проводили в условиях закрытого наземного

стенда Ц-17Т ФАУ «ЦИАМ им. П. И. Баранова» согласно требованиям европейского агентства по авиационной безопасности EASA. В качестве вулканического пепла использовали натуральный пепел современных извержений камчатского вулкана Шивелуч. Показано, что попадание пепла в двигатель ПД-14 с максимально допустимой в Европе концентрацией 4 мг/м^3 в течение одного часа не приводит к изменению тяговых характеристик ПД-14 и возникновению нежелательных последствий. Особое внимание уделено воздействию вулканического пепла на камеру сгорания и турбину двигателя. Приведены данные рентгеноспектрального анализа стекловидных отложений пепла на элементах турбины. Проведен численный расчет модельной области генерации стекловидных отложений пепла Шивелуча в газоздушном тракте двигателя ПД-14.

Ключевые слова: вулканический пепел; авиационный газотурбинный двигатель; камера сгорания; турбина; сопловые лопатки турбины; стекловидные отложения; андезит; рентгеноспектральный анализ.

ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение атмосферы вулканическим пеплом представляет угрозу для безопасности полетов авиационной техники [2].

Вулканический пепел состоит в основном из твердых мелких и тонких остроугольных обломков вулканического стекла, породы, минералов (плагиоклаза, пироксена, роговой обманки, титаномагнетита) и их сростков. Он обладает высокой абразивностью, поэтому при попадании воздушного судна в пепловое облако возможен значительный эрозионный износ поверхности самолета, включая элементы его маршевых двигателей. Кроме того, температура плавления частиц пепла ниже температуры газов в современных реактивных двигателях на крейсерском режиме полета, что обуславливает плавление пепла в камере сгорания и его налипание на элементы горячей части двигателя.

Облако вулканического пепла содержит магматические газы: соединения серы, хлора, фтора и других активных химических элементов, которые оказывают коррозионное воздействие на планер и опасны для здоровья людей, т.к. могут попасть в салон самолета из двигателя через бортовую систему кондиционирования. Является совершенно очевидным, что вулканический пепел в атмосфере может создавать серьезную опасность для воздушного судна в полете [3–6].

Содержательная информация о критическом воздействии вулканического пепла на авиационные газотурбинные двигатели получена, главным образом, в результате исследований западных турбореактивных двигателей типа RB211-524D4, CF6-80C2, подвергнувшихся выключению при полете в вулканическом облаке [7–10]. На рис. 1 показано состояние соплового аппарата первой ступени турбин данных двигателей в результате воздействия вулканического пепла.

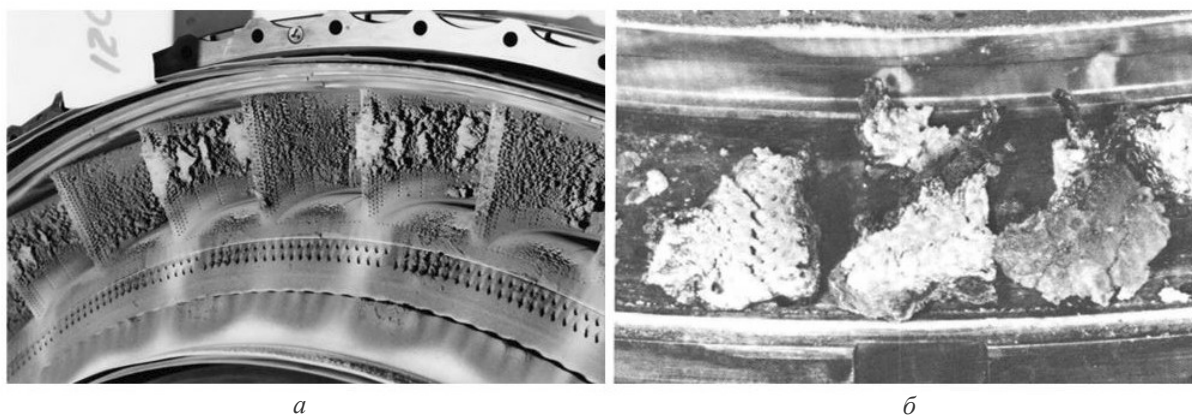


Рис. 1. Воздействие вулканического пепла на сопловой аппарат первой ступени турбины различных ГТД: а – двигатель RB211-524D4, вулкан Галунггунг, Индонезия, 1982 г. [8, стр. 13]; б – двигатель CF6-80C2, вулкан Редаут, Анкоридж, США, 1989 г. [7, стр. 131, fig. 4]

Причина выключений газотурбинных двигателей RB211-524D4, CF6-80C2 связана с тем, что частицы вулканического пепла под воздействием высокой температуры газа в камере сгорания оплавляются и образуют стекловидные отложения на первом после камеры сгорания сопловом аппарате турбины. Образующиеся отложения на сопловом аппарате аккумулируются и перекрывают часть площади проходного сечения межлопаточного канала турбины, тем самым нарушают газодинамические процессы в тракте двигателя. При значительных отложениях запасы газодинамической устойчивости существенно снижаются, возникает помпаж и потеря тяги двигателя.

Безусловно, эти материалы, как и другие результаты в этой сугубо междисциплинарной области, должны быть тщательно проанализированы и сопоставлены с результатами аналогичных исследований РФ. Но проблема в том, что отечественный экспериментальный опыт исследований турбомашин при воздействии вулканического пепла отсутствует. Едва ли не единственными российскими источниками знаний пепловой проблемы в авиадвигателестроении являются отчеты ЦИАМ и публикации Камчатской группы реагирования на вулканические извержения (KVERT – Kamchatkan Volcanic Eruption Response Team) Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, обеспечивающей международное аэронавигационное сообщество информацией о вулканической деятельности на Дальнем Востоке [11, 12].

В этой связи целью статьи является ознакомление научной авиационной общественности РФ с основными материалами натурных испытаний ПД-14 при попадании вулканического пепла в газоздушный тракт двигателя и результатами сопровождающего численного моделирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ДВИГАТЕЛЯ ПД-14 ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВУЛКАНИЧЕСКОГО ПЕПЛА

В мае-июне 2021 года на закрытом наземном стенде Ц-17Т ФАУ «ЦИАМ им. П. И. Баранова» провели испытания на устойчивость к воздействию вулканического пепла газогенератора двигателя ПД-14. Данные испытания являются первыми в РФ экспериментальными исследованиями по проблеме воздействия вулканического пепла на газотурбинные двигатели.

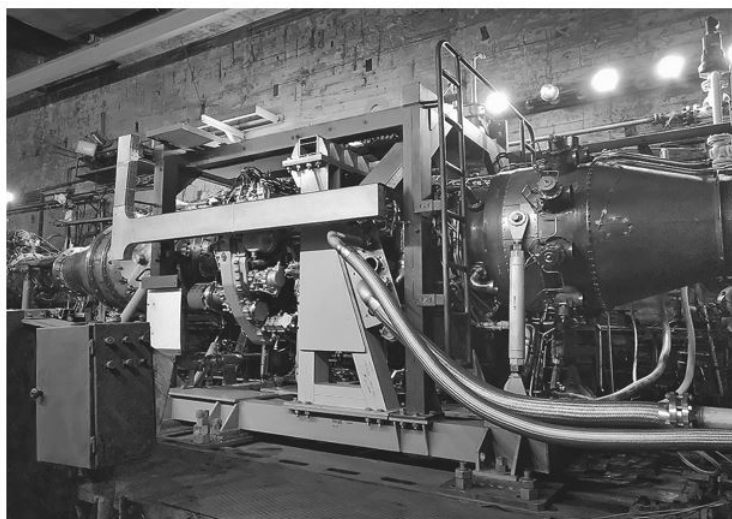
Испытания организованы в рамках работ по валидации Сертификата типа двигателя ПД-14 в Европейском агентстве авиационной безопасности EASA в части требований пункта CS-E 1050 «Flight in Airspace with Contamination of Volcanic Ash» («Воздействие опасных факторов вулканических облаков»).

ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ

Объектом испытаний являлся газогенератор двигателя ПД-14, содержащий высоконапорный восьмиступенчатый компрессор, малоэмиссионную камеру сгорания кольцевого типа и высокоэффективную двухступенчатую турбину.

В соответствии с программой испытаний воспроизводилась работа полноразмерного двигателя ПД-14 в условиях крейсерского режима полета самолета ($H = 11\,000$ м, $M_{\Pi} = 0,8$ МСА). При вводе пепла в двигатель использовался «дозовый» подход, впервые предложенный фирмой Rolls-Royce и в настоящее время являющийся стандартом для проведения соответствующих испытаний ГТД. Он заключается в том, что по результатам многочисленных спутниковых и метеорологических наблюдений определены представительные концентрации пепла, величины которых умножаются на время воздействия, и дают, таким образом, представление об общем объеме пепла, который должен быть заброшен в двигатель [13]. Согласно программе испытаний на вход в газогенератор в течение одного часа выполняли дозированную подачу вулканического пепла с концентрацией 4 мг/м³. Общий вес заброшенного пепла за испытание составил $0,828$ кг.

Размещение газогенератора ПД-14 на стенде Ц-17Т и внешний вид специального устройства заброса вулканического пепла показаны на рис. 2.



а



б

Рис. 2. Проведение испытаний ПД-14 по забросу вулканического пепла:
а – размещение газогенератора ПД-14 на стенде; *б* – пылящая установка

Регистрацию экспериментальных данных осуществляли информационной измерительной системой стенда, которая обеспечивала непрерывное автоматическое измерение параметров объекта испытаний.

ПАРАМЕТРЫ ВУЛКАНИЧЕСКОГО ПЕПЛА

В качестве вулканического пепла использовали пепел камчатского вулкана Шивелуч ($56^{\circ}38'10''$ с.ш., $161^{\circ}18'54''$ в.д., высота активного лавового купола ~ 2500 м), который расположен на пересечении Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг, на расстоянии 50 км от п. Ключи и 450 км от г. Петропавловск-Камчатский.

Фото эксплозивного извержения вулкана Шивелуч представлено на рис. 3.

Состав пепла Шивелуча в наибольшей степени отвечает рекомендациям сертификационных норм, однако потребовалась специальная подготовка пепла к испытаниям, которая была выполнена в Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН [14].



Рис. 3. Эксплозии вулкана Шивелуч подняли пепел до 10 км над уровнем моря 04 декабря 2017 г., фото Ю. Демянчука

Были соблюдены следующие основные условия: пепел вулканический – натуральный; пепел четырех современных извержений вулкана Шивелуч (2005, 2010, 2013, 2019 гг.) – свежий; пеплы по химическому составу относятся к известково-щелочным умеренно-калиевым андезитами и дацитами, содержание SiO_2 составляет от 57,28 до 65,64 %, т.е. соответствует рекомендуемому ICAO составу SiO_2 – 56–64 %.

В табл. 1 представлены химические составы пеплов Шивелуча (средний) и некоторых активных вулканов мира.

Таблица 1. Средние химические составы пеплов Шивелуча и некоторых активных вулканов мира

Оксиды в мас. %	Шивелуч, Россия [14]	Редаут, США [15]	Мон-Пеле, Карибы [16]	Мейон, Филиппины [16]	Сент-Хеленс, США [16]
SiO_2	62,20	62,45	60,01	56,2	67,00
TiO_2	0,57	0,47	0,45	0,68	0,64
Al_2O_3	16,08	17,96	17,54	19,13	16,10
Fe_2O_3	4,20	5,02	7,18	7,82	4,50
CaO	6,46	6,06	6,80	8,54	4,10
MgO	2,91	1,95	2,26	3,71	1,50
Na_2O	4,47	4,13	3,41	4,15	4,60
K_2O	1,55	1,61	0,89	1,16	1,70
MnO	0,09	0,13	0,23	0,20	–
P_2O_5	0,15	0,20	0,13	0,28	0,13
сумма	98,68	99,48	98,90	101,98	100,27

Из данных табл. 1 следует, что средний химический состав пеплов четырех современных извержений вулкана Шивелуч наиболее сходен с составом пепла вулкана Редаут, указанного в рекомендованном списке ICAO и воздействие которого показано на рис. 1, б.

Испытания ПД-14 проводили с измельченным пеплом, размер частиц которого имел диапазон 10–100 мкм, что характерно для дисперсного состава загрязняющих воздух пеплов на расстоянии 800–1000 км от места извержения. Гранулометрический состав примененного пепла Шивелуча показан на рис. 4.

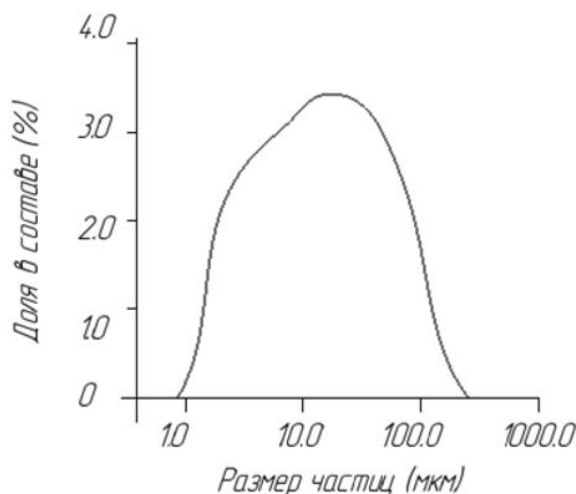


Рис. 4. Гранулометрический состав образца пепла вулкана Шивелуч

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ ИСПЫТАНИЙ

По результатам анализа зарегистрированной в процессе испытаний информации, а также по результатам проведенной затем разборки газогенератора и дефектации его деталей сделаны следующие основные выводы:

- в процессе заброса вулканического пепла параметры газогенератора двигателя ПД-14 практически не изменялись;
 - детали компрессора, камеры сгорания, турбины, узлы внешних систем, трубопроводные и электрические коммуникации находятся в удовлетворительном состоянии и пригодны к дальнейшей эксплуатации;
 - попадание вулканического пепла на вход в двигатель ПД-14 не приводит к снижению его тяговых характеристик и возникновению нежелательных последствий.
- Эрозия элементов двигателя от воздействия пепловых частиц отсутствует.

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ И ТУРБИНЫ

Особое внимание уделили наличию стекловидных отложений в газоздушном тракте двигателя, которые наблюдались только на элементах горячей части двигателя, а именно стекловидные отложения выявили на всех сопловых лопатках первой ступени турбины; значительно меньшее количество отложений наблюдалось на первой рабочей и второй сопловой лопатке (менее 0,01 % от площади поверхности, в виде капель диаметром 0,2–0,6 мм); отложений на второй рабочей лопатке турбины и далее по потоку не выявлено. На первой сопловой отмечены вытянутые стекловидные образования, получившиеся в результате растекания капель в направлении движения потока воздуха. На дефлекторах и теплозащитных панелях жаровой трубы камеры сгорания имеются стекловидные отложения темно-коричневого цвета в виде мелких шариков (агломератов) размером до 0,5 мм, образовавшихся из частиц пепла в зоне горения. В местах наиболее интенсивного отложения частиц пепла на поверхности дефлекторов и теплозащитных панелей образовалась пленка толщиной до 0,5–0,6 мм.

На рис. 5 представлен примерный вид стекловидных отложений на одной из сопловых лопаток первой ступени турбины ПД-14.

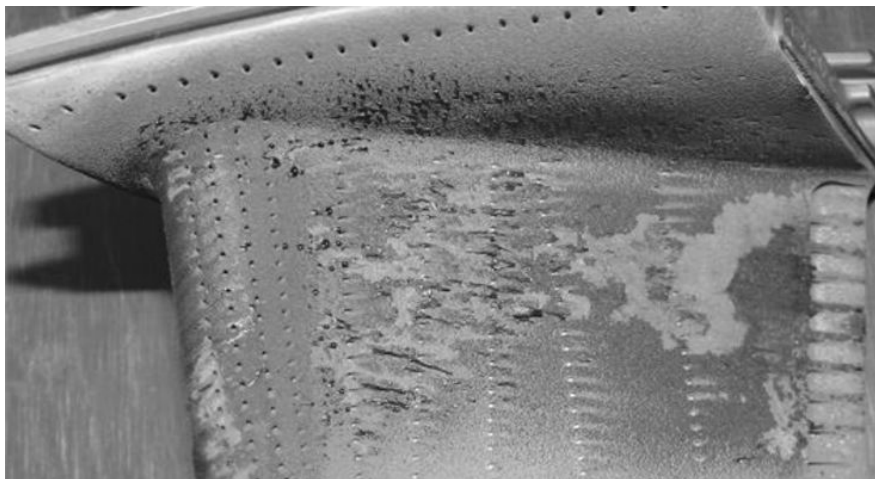


Рис. 5. Стекловидные отложения на корыте сопловой лопатки первой ступени турбины, соответствующие воздействию пепла в течении 60 минут при концентрации 4 мг/м³

Установлено, что отложения отличаются по структуре и цвету. На полке сопловой лопатки первой ступени видны мелкие темно-коричневые шарики размером до 0,5 мм, подобно выявленным в жаровой трубе.

Толщина отложений серого цвета незначительна. Присутствует частичное перекрытие отверстий перфорации. В ряде случаев отчетливо наблюдаются следы растекания жидкой фазы пепла по лопатке (корыту и спинке) под воздействием газового потока.

По данным микроанализа с помощью оптического микроскопа Zeiss Observer.D1m в условиях бюро металлографических исследований АО «ОДК-Авиадвигатель» установлено, что стекловидный материал серого цвета имеет губчато-слоистое строение, плотно сцеплен с керамическим теплозащитным покрытием ZrO_2 -Y лопаток турбины (рис. 6).

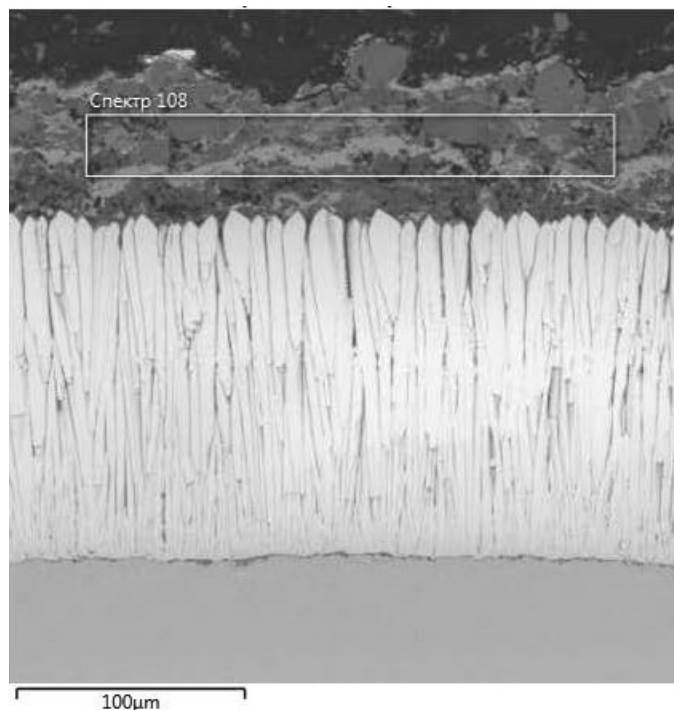


Рис. 6. Структура стекловидного материала на керамическом теплозащитном покрытии рабочей лопатки первой ступени турбины

Микрорентгеноспектральным анализом с помощью сканирующего электронного микроскопа MIRA 3 LMH с использованием приставки AZtecEnergy в составе отложений выявлены следующие элементы: O – 36,62 ... 42,53 %, Fe – 12,44 ... 20,68 %, Al – 7,66 ... 17,73 %, Si – 10,79 ... 21,65 %, Ti – 1,72 ... 4,34 %, Ca – 3,23 ... 4,76 %, Mg – 3,50 ... 5,70 %, Ni – 1,28 ... 1,70 % (рис. 7).

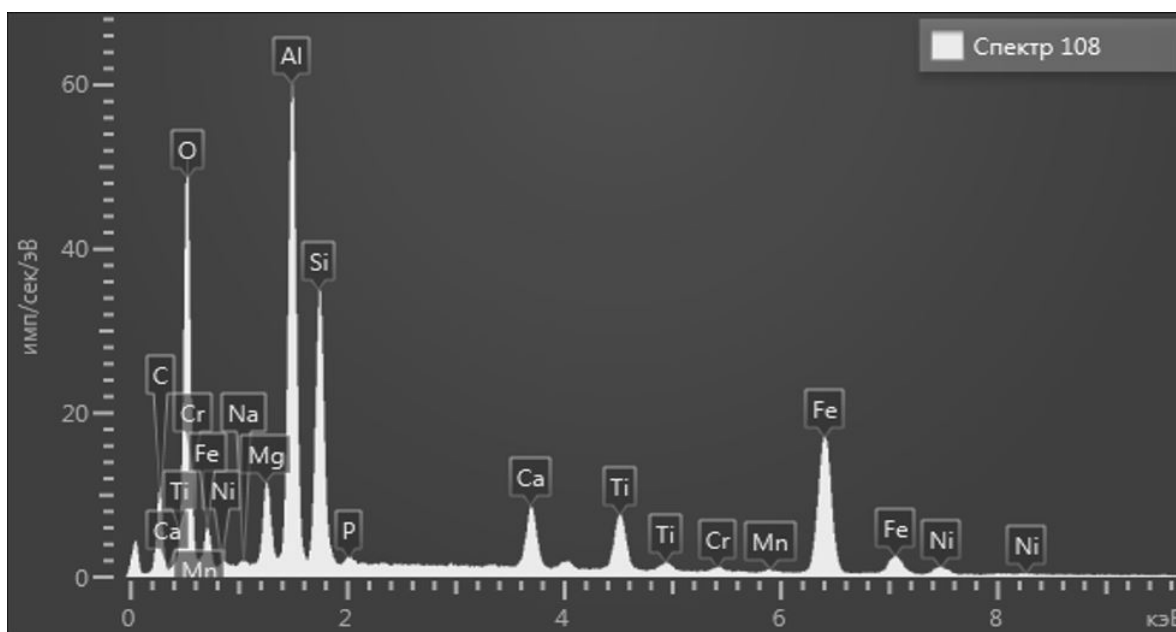


Рис. 7. Пример результатов микрорентгеноспектрального анализа отложений вулканического пепла на лопатках турбины высокого давления

Все данные элементы входят в состав пепла вулкана Шивелуч, используемого при испытаниях газогенератора ПД-14. Первичный анализ данных химического состава отложений показывает, что по среднему составу отложения соответствуют вулканической породе – андезиту. Основная масса образовавшегося материала представляет собой агломерат пеплового вещества, состоящий, вероятно, из вулканического стекла SiO_2 и минералов: роговая обманка $\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe,Al})_5(\text{Al,Si})_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$, плагиоклазы (группа минералов ряда альбит $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ – анортит $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), возможно, оливин (группа минералов ряда форстерит $\text{Mg}_2[\text{SiO}_4]$ – фаялит $\text{Fe}_2[\text{SiO}_4]$).

В дальнейшем планируется углубленное изучение образовавшегося вещества на специализированном геологическом оборудовании.

Под набросом состояние керамического покрытия, нанесенного по различным технологиям на всех типах лопаток, не претерпело структурных и фазовых превращений – не спеклось, не скололось, без шелушения и трещин.

РЕЗУЛЬТАТЫ СОПРОВОЖДАЮЩЕГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для повышения достоверности полученных экспериментальных данных проведен численный CFD-расчет модельной области генерации стекловидных отложений пепла Шивелуча в газоздушном тракте двигателя ПД-14 на основном режиме испытаний (рис. 8).

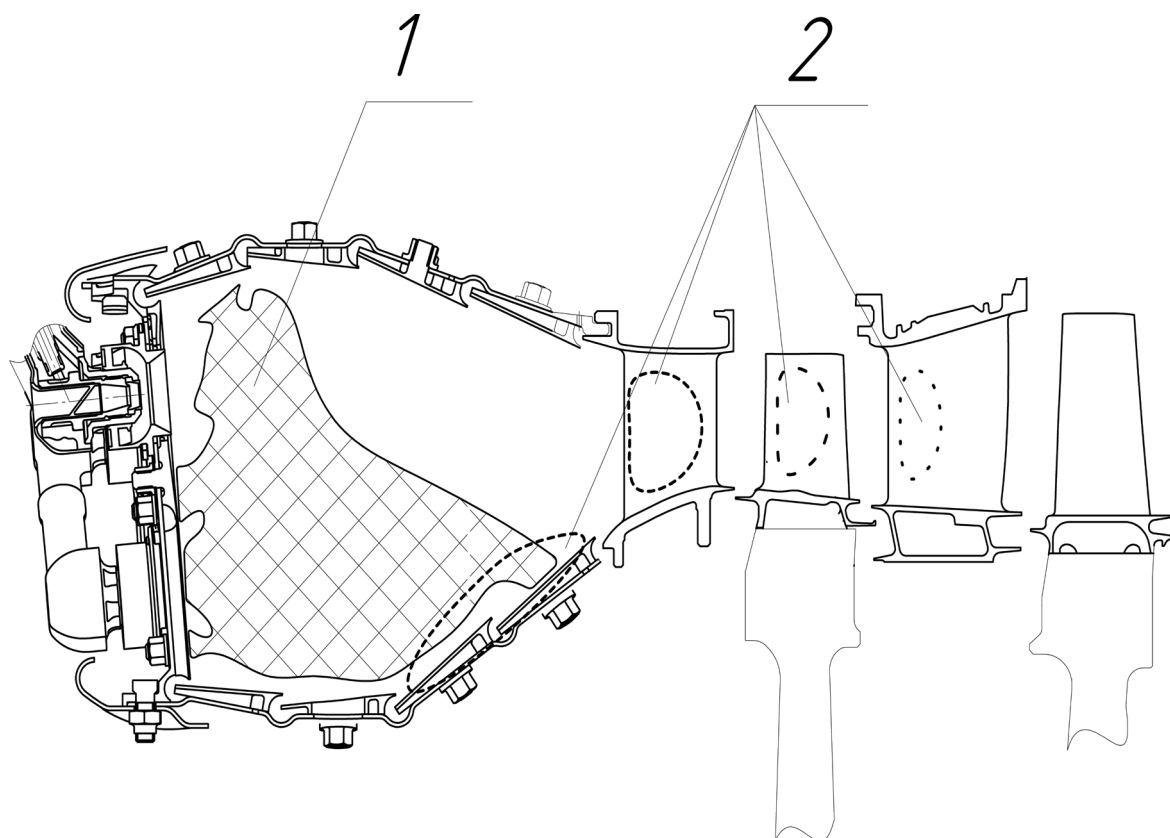


Рис. 8. Фазовые преобразования вулканического пепла по тракту двигателя:

1 – расчетная зона генерации жидкой фазы пепла; 2 – фактическая зона стекловидных отложений

Для определения зоны генерации жидкой фазы вулканического пепла в двигателе (зоны с температурой выше $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ – ликвидуса, выбранной на основании исследования [17, табл. 3, стр. 70]) был выполнен 3D-расчет теплофизических и газодинамических процессов в камере сгорания двигателя ПД-14 на режиме испытаний. На рис. 8 показано сечение «горячей» проточной части двигателя с нанесенной на нее зоной 1 (заштрихованная область) генерации жидкой фазы вулканического пепла. По результатам расчета установлено, что внутри жаровой трубы наблюдаются значительные объемы зон с температурой газов, превышающей температуру плавления вулканического пепла. Объемы высокотемпературных зон, в которых возможно плавление частиц вулканического пепла на режиме испытаний, превышают 50 % от объема жаровой трубы камеры сгорания.

На рис. 8 также показана фактическая зона 2 (штриховая линия), которая охватывает элементы камеры сгорания и газовой турбины, где были выявлены отложения вулканического пепла по результатам разборки двигателя после испытаний. Структура, состав и количество этих отложений были описаны выше.

Из представленных данных следует:

- 1) наиболее интенсивное отложение частиц в двигателе происходит в камере сгорания и на лопатках первого соплового аппарата;
- 2) значительное количество отложений на внутреннем кожухе камеры сгорания находится в месте протяженного приближения зоны генерации жидкой фазы ($T > 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$) к стенкам жаровой трубы.

Таким образом, численный расчет удовлетворительно коррелирует с экспериментальными данными испытаний двигателя ПД-14 вулканическим пеплом, а также с информацией

о повреждениях в зарегистрированных случаях попадания в реальное облако вулканического пепла.

На основании испытаний в соответствии с требованиями CS-E 1050 были подготовлены требования по эксплуатации двигателя ПД-14 и воздушного судна, оснащенного двигательной установкой на базе ПД-14, рекомендации экипажу при попадании самолета в облако вулканического пепла и специалистам авиакомпаний для организации обслуживания двигателя, оказавшегося в условиях воздействия вулканического пепла [13].

ВЫВОДЫ

Впервые в отечественном авиадвигателестроении были успешно проведены испытания газогенератора авиационного двигателя пятого поколения типа ПД-14 при подаче вулканического пепла согласно требованиям EASA.

По результатам испытаний установлено, что попадание вулканического пепла на вход в двигатель с максимально допустимой в Европе концентрацией 4 мг/м³ в течение одного часа не приводит к снижению его тяговых характеристик и возникновению нежелательных последствий. Эрозия элементов двигателя от воздействия пепловых частиц отсутствует.

В горячей части ПД-14 выявлены стекловидные отложения, которые не оказали влияние на состояние теплозащитного покрытия и существенное запыление отверстий перфорации лопаток турбин.

Результаты математического моделирования области генерации стекловидных отложений в газозвушном тракте ПД-14 удовлетворительно согласуются с полученными экспериментальными данными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Двигатель ПД-14 и семейство перспективных двигателей.** [Электронный ресурс]. URL: <https://www.avid.ru/pd14/> (дата обращения 25.02.2022). [Engine PD-14 and a family of advanced engines (2022, Feb. 25). [Online]. Available: <https://www.avid.ru/pd14/>]
2. **Davison C. R., Rutke T.** Assessment and Characterisation of Volcanic Ash Threat to Gas Turbine Engine Performance // National Research Council Canada. Canada, Ottawa, 2014.
3. **Flight Safety and Volcanic Ash** // International civil aviation organization. First edition. 2012. 46 p.
4. **Извержения вулканов Камчатки и Северных Курил в 2016 г. и их опасность для авиации / О. А. Гирина [и др.]** // Вулканология и сейсмология. 2019. № 3. С. 34–48. [O. A. Girina, et al., "The 2016 Eruptions in Kamchatka and on the North Kuril Islands: The Hazard to Aviation", (in Russian), in *Journal of Volcanology and Seismology*, vol. 3, no. 3, pp. 157-171, 2019. DOI: 10.1134/S0742046319030047.]
5. **Кирьянов В. Ю.** Вулканические пеплы Камчатки как источник потенциальной опасности для пассажирских авиалиний // Вулканология и сейсмология. 1992. № 3. С. 16–36. [V. Yu. Kirianov, "Assessment of Kamchatkan Ash Hazard to Airlines", (in Russian), in *Volcanol. Seismol.*, no. 14, pp. 246-269, 1993.]
6. **Заболотников Г. В., Богаткин О. Г.** Перспективы использования современных технологий при обеспечении полетов в зонах, подверженных влиянию вулканической деятельности // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. Метеорология. 2016. № 42. С. 124–133. [G. V. Zabolotnikov, O. G. Bogatkin, "Prospects of modern technology applications for flight servicing in regions of volcanic activity", (in Russian), in *Uchenye zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta. Meteorologiya*, no. 42, pp. 124-133, 2016.]
7. **Przedpelski Z., Casadevall Th.** Impact of Volcanic Ash from 15 December 1989 Redoubt Volcano Eruption on GE CF6-80C2 Turbofan Engines // Proceedings of the First International Symposium on Volcanic Ash and Aviation Safety. U.S. Geological Survey Bulletin 2047. 1991. Pp. 129-135.
8. **Clarkson R.** Volcanic Ash Impacts on Jet Engines and Developments since 2010. Rolls-Royce (Aero Engines), 29th January 2019. 23 p.
9. **Johnson W., Casadevall Th.** Aviation Safety and Volcanic Ash Clouds in the Indonesia-Australia Region // Proceedings of the First International Symposium on Volcanic Ash and Aviation Safety. U.S. Geological Survey Bulletin 2047. 1991. Pp. 191-197.
10. **Dunn M., Wade D.** Influence of Volcanic Ash Clouds on Gas Turbine Engines // Proceedings of the First International Symposium on Volcanic Ash and Aviation Safety. U.S. Geological Survey Bulletin 2047. 1991. Pp. 107-117.

11. **Камчатская** группа реагирования на вулканические извержения (KVERT). [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/> (дата обращения 31.03.2022). [Kamchatka Volcanic Eruption Response Team (KVERT) (2022, Mar. 31). [Online]. Available: <http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/>]

12. **Гирина О. А., Гордеев Е. И.** Проект KVERT – снижение вулканической опасности для авиации при эксплозивных извержениях вулканов Камчатки и Северных Курил // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2007. № 2. С. 100–109. [О. А. Girina, E. I. Gordeev, "KVERT project: reduction of volcanic hazards for aviation from explosive eruptions of Kamchatka and Northern Kuriles volcanoes", (in Russian), in *Vestnik Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossijskoj akademii nauk*, no. 2, pp. 100-109, 2007.]

13. **Газогенератор** двигателя ПД-14 успешно прошел испытания вулканическим пеплом / И. С. Павлецов [и др.] // Информационно-технический бюллетень Пермские авиационные двигатели. 2021, № 48. С. 30–33. [I. S. Pavletsov, et al., "The gas generator of the PD-14 engine successfully passed the tests with volcanic ash", (in Russian), in *Informacionno-tehnicheskij byulleten Permskie aviacionnye dvigateli*, no. 48, pp. 30-33, 2021.]

14. **Гирина О. А.** Научно-технический отчет «Подготовка пепла вулканического происхождения для проведения испытаний по проверке его воздействия на работоспособность авиационного двигателя». ИВиС ДВО РАН, 2020. [О. А. Girina, *Scientific and technical report "Preparation of ash of volcanic origin for testing to verify its impact on the performance of an aircraft engine"*, (in Russian). IV&S FEB RAS, 2020.]

15. **Andesites** of the 2009 eruption of Redoubt Volcano, Alaska / M. L. Coombs, et al. // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2013. Vol. 259. Pp. 349-372. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2012.01.002.

16. **Heiken G., Wohletz K.** Volcanic ash. Berkeley-Los Angeles-London: University of California Press, 1985. 246 p.

17. **Кирьянов В. Ю., Фелицын С. Б.** Вулканический пепел как природный фактор риска для авиации (по данным исследования свойств пепловых частиц) // Вулканология и сейсмология. 2000. № 5. С. 65–72. [V. Yu. Kirianov, S. B. Felitsyn, "Volcanic ash as a natural risk factor for airplanes (based on ash properties)", (in Russian), in *Vulkanologiya i sejsmologiya*, no. 5, pp. 65-72, 2000.]

ОБ АВТОРАХ

ИНОЗЕМЦЕВ Александр Александрович, академик РАН, проф., д-р техн. наук, зам. ген. директора АО «ОДК» по управлению НПК «Пермские моторы», управляющий директор – ген. конструктор АО «ОДК-Авиадвигатель».

ПОПОВА Диана Дмитриевна, инж. отд. турбин АО «ОДК-Авиадвигатель», асп. ПНИПУ.

АБРАМЧУК Тарас Викторович, зам. нач. отд. камер сгорания АО «ОДК-Авиадвигатель».

ГИРИНА Ольга Алексеевна, канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотр. Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.

РЫСИН Лев Самойлович, канд. техн. наук, сотр. ЦИАМ.

КУПЦОВ Сергей Владимирович, канд. техн. наук, нач. отд. ЦИАМ.

САЖЕНКОВ Алексей Николаевич, канд. техн. наук, помощник управляющего директора АО «ОДК-Авиадвигатель».

СЕНДЮРЕВ Станислав Игоревич, канд. техн. наук, нач. бригады отд. турбин АО «ОДК-Авиадвигатель».

ЧЕЛОМБИТЬКО Александр Владимирович, ст. науч. сотр. ЦИАМ.

ГАЛЛЯМОВ Марат Димович, зам. нач. отд. АО «ОДК-Авиадвигатель».

ДВИНСКИХ Андрей Вячеславович, нач. бригады АО «ОДК-Авиадвигатель».

INOZEMTSEV, Alexander Alexandrovich, Academician of the Russian Academy of Sciences, Prof., Dr. of Tech. Sci., Deputy General Director of JSC "UEC" for the management of NPK "Perm Motors", Managing Director – General Designer of JSC "UEC-Aviadvigatel".

POPOVA, Diana Dmitrievna, Engineer of the turbine dept. of JSC "UEC-Aviadvigatel", postgraduate student of PNRPU.

ABRAMCHUK, Taras Viktorovich, Deputy Head of the Combustion Chambers Dept. of JSC "UEC-Aviadvigatel".

GIRINA, Olga Alekseevna, Cand. of Geol. and Mineral. Sci., Leading Researcher, Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.

RYSIN, Lev Samoylovich, Cand. of Tech. Sci., CIAM employee.

KUPTSOV, Sergey Vladimirovich, Cand. of Tech. Sci., Head of CIAM dept.

SAZHENKOV, Aleksey Nikolaevich, Cand. of Tech. Sci., Assistant to the Managing Director of JSC "UEC-Aviadvigatel".

SENDYUREV, Stanislav Igorevich, Cand. of Tech. Sci., Head of the Team of the Turbine Dept. of JSC "UEC-Aviadvigatel".

CHELOMBITKO, Alexander Vladimirovich, Senior Researcher, CIAM.

GALLYAMOV, Marat Dimovich, Deputy Head of Dept. of JSC "UEC-Aviadvigatel".

DVINSKIKH, Andrey Vyacheslavovich, Head of the team of JSC "UEC-Aviadvigatel".

Language: Russian.

Source: *Vestnik UGATU* (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 26, no. 2 (96), pp. 60-70, 2022. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).