

УДК 629.7.036.3

DOI: 10.15593/2224-9982/2024.78.02

**Д.Д. Попова<sup>1,2</sup>, А.Н. Саженов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ОДК-Авиадвигатель, Пермь, Российская Федерация

<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Российская Федерация

## **О ВОЗДЕЙСТВИИ ВУЛКАНОВ НА РАБОТУ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Проанализированы основные механизмы воздействия вулканического пепла на различные типы авиационных газотурбинных двигателей. Приведены результаты инженерных испытаний работы двухконтурных газотурбинных двигателей PW F100 при воздействии вулканического пепла. Рассмотрено воздействие вулканического пепла на двигатели Rolls-Royce RB211-524D4 и General Electric CF6-80C2 самолетов Boeing 747, когда произошли выключения всех двигателей самолета в полете. Основными повреждениями двигателя являются: абразивно-эрозионный износ лопаток компрессора; формирование и аккумуляция отложений оплавленных частиц пепла на элементах камеры сгорания и лопатках турбины высокого давления.

Подтверждено, что наиболее критичным последствием воздействия вулканического пепла на газотурбинный двигатель является формирование и аккумуляция стекловидных отложений на лопатках турбины. Особо опасным в данном случае будет появление отложений в межлопаточных каналах соплового аппарата первой ступени, так как достижение в нем критической скорости течения при меньших проходных сечениях приводит к дросселированию расхода воздуха через двигатель, и, как следствие, снижению запаса устойчивой работы компрессора, и помпажу.

Представленные в открытых источниках зарубежные материалы сопоставляются с результатами сертификационных испытаний газотурбинного двигателя ПД-14 на устойчивость к вулканическому пеплу.

Определены дальнейшие направления исследований: разработка модели аккумуляции отложений пеплового материала на первых сопловых лопатках газовой турбины, также моделирование зон генерации жидкой фазы вулканического пепла в камере сгорания газотурбинного двигателя на разных режимах работы двигателя с учетом температурных параметров пепловых частиц.

Представленные исследования проводятся под руководством академика РАН А.А. Иноземцева.

**Ключевые слова:** авиационный газотурбинный двигатель, вулканический пепел, извержения вулканов и безопасность авиационной техники, эрозионный износ, генерация жидкой фазы вулканического пепла, стеклование и стекловидные отложения, аккумуляция пепловых отложений, уменьшение площади проходного сечения двигателя, засорение отверстий охлаждения лопатки, помпаж.

**D.D. Popova<sup>1,2</sup>, A.N. Sazhenkov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>UEC-Aviadvigatel, Perm, Russian Federation

<sup>2</sup>Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **VOLCANO IMPACT ON THE GAS TURBINE ENGINES OPERATION**

The paper analyzes the main mechanisms of the volcanic ash impact on various types of aviation gas turbine engines. The results of engineering tests of the operation of two-circuit gas turbine engines PW F100 under the influence of volcanic ash are presented. The impact of volcanic ash on the Rolls-Royce RB211-524D4 and General Electric CF6-80C2 engines of Boeing 747 aircraft when all aircraft engines were shut down in flight is considered. The main engine damages are: abrasive-erosive depreciation of compressor blades; formation and accumulation of deposits of melted ash particles on combustion chamber elements and high-pressure turbine blades.

It is confirmed that the most critical consequence of the impact of volcanic ash on a gas turbine engine is the formation and accumulation of vitreous deposits on the blades of the nozzle apparatus of the first stage of the turbine.

The foreign materials presented in open sources are compared with the results of certification tests of the PD-14 gas turbine engine for resistance to volcanic ash.

Further research directions have been identified as development of a model for the accumulation of ash material deposits on the first nozzle blades of a gas turbine, as well as modeling of generation zones (volumes) of the liquid phase of volcanic ash in the combustion chamber of a gas turbine engine at different engine operating modes, taking into account the temperature parameters of ash particles.

The presented research is performed under the leadership of Academician of the Russian Academy of Sciences A.A. Inozemtsev.

**Keywords:** aircraft engine, volcanic ash, volcanic eruptions and aviation safety, erosive depreciation, liquid phase generation, glassification and glassy deposits, accumulation of ash deposits, reduction of the engine flow area, blade cooling holes clogging, surge.

## Введение

Серьезную опасность для летательных аппаратов представляют собой облака вулканического пепла, выброшенные в атмосферу действующими на территории Земли более чем 800 вулканами [1–5]. При извержении вулкана выбрасывается большое количество мелкодисперсного пепла, который может подниматься на высоту до 50 км, частицы пепла могут находиться в воздухе несколько недель или месяцев и распространяться на расстояние более 1000 км от вулкана. Частицы пепла размером меньше 1 мкм могут оставаться на высоте годами. Примерная схема распространения облаков вулканического пепла представлена на рис. 1.



Рис. 1. Распространение облаков вулканического пепла

Для большинства видов вулканического пепла основным минералом является кремнезем ( $\text{SiO}_2$ ) в сочетании с меньшими количествами оксидов алюминия, железа, кальция и натрия. Этот стекловидный силикатный материал обладает большой твердостью и чрезвычайно высокими абразивными свойствами [6–9]. Вулканический пепел воздействует на фюзеляж и аэродинамические поверхности самолета, турбореактивные двигатели, антенны, приемники воздушного давления и температуры и может вывести эти системы из строя. Основные элементы летательного аппарата, которые в большей степени подвергаются воздействию вулканического пепла, представлены на рис. 2.



Рис. 2. Воздействие вулканического пепла на элементы летательного аппарата

Имеющаяся на сегодняшний день статистика показывает, что при попадании летательного аппарата в облако вулканического пепла повреждения газотурбинных двигателей происходят в 55 % случаев, а выключение хотя бы одного из них – в 20 % [10, 11]. Особо опасным воздействием вулканического пепла на летательный аппарат является повреждение его газотурбинных двигателей, так как их отказ и неустойчивая работа могут привести к катастрофическим последствиям при совершении полета. Это подтверждается присвоением подобным инцидентам максимальных значений индекса тяжести последствий по критериям ICAO [1].

С учетом вышесказанного целью настоящей статьи является оценка основных механизмов воздействия вулканического пепла на детали и сборочные единицы различных типов газотурбинного двигателя.

### **Воздействие вулканического пепла на элементы авиационного газотурбинного двигателя**

При анализе повреждений, наносимых летательным аппаратам (ЛА) вулканическим пеплом, прежде всего необходимо рассматривать его воздействие на двигатели ЛА. Основными проявлениями этого процесса являются эрозионно-абразивные повреждения компрессора газотурбинного двигателя (ГТД), аккумуляция отложений пеплового материала на лопатках турбины высокого давления, засорение топливных форсунок и системы охлаждения турбины.

«Огни святого Эльма» являются первичным видимым диагностическим признаком попадания самолета в облако вулканического пепла. Данное явление представляет собой белое свечение при концентрациях вулканического пепла выше  $40 \text{ мг/м}^3$ . Данное явление было воспроизведено во время испытаний корпорации Calspan [8]. На рис. 3 представлено явление на входе в двигатель.

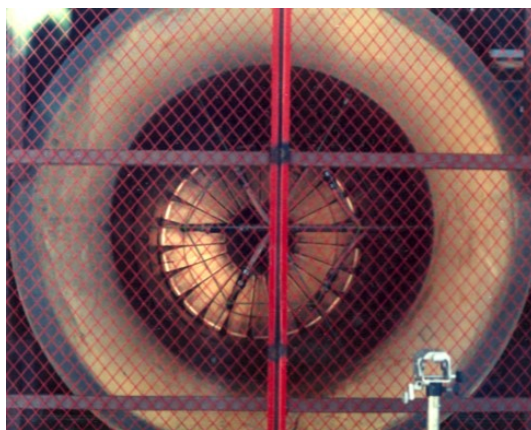


Рис. 3. «Огни Святого Эльма» на входе в двигатель (фото корпорации Calspan) [10]

Характерным механизмом повреждения компрессора является абразивно-эрозионный износ лопаток. На рис. 4 показаны эрозионные повреждения лопаток компрессора двигателя PW F100 при концентрации вулканического пепла  $500 \text{ мг/м}^3$ .

На рис. 4 видно утончение торцевого профиля лопатки компрессора четвертой ступени. Подобные повреждения снижают запас газодинамической устойчивости компрессора, его напорность.

Наиболее тяжелыми с точки зрения последствий являются повреждения, связанные с отложением оплавленных частиц пепла на узлах горячей части двигателя, главным образом на сопловом аппарате первой ступени турбины, что приводит к существенному снижению наименьшей площади проходного сечения (на 7...12 % и более) и, как следствие, к непрекращающимся помпажам компрессора, выключению двигателя в полете и невозможности его повторного включения.

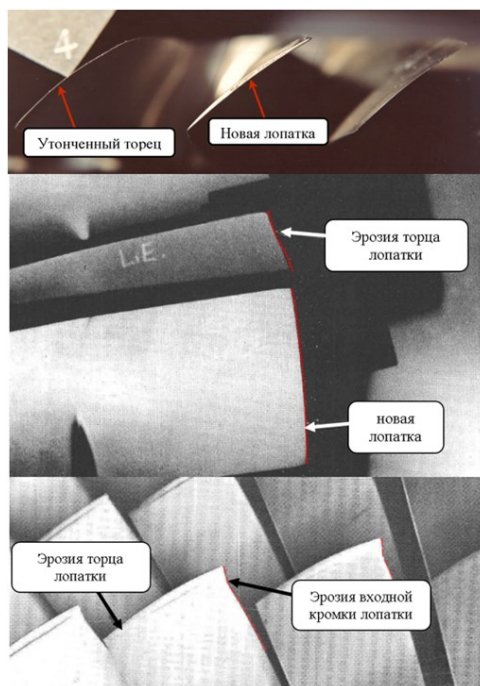


Рис. 4. Абразивно-эрозионный износ лопаток компрессора вследствие попадания вулканического пепла в тракт ГТД [10]

При испытаниях двигателя PW F100 корпорации Calspan в условиях попадания на его вход вулканического пепла регистрировалось изменение давления воздуха за компрессором (рис. 5). В данных испытаниях происходил помпаж двигателей.

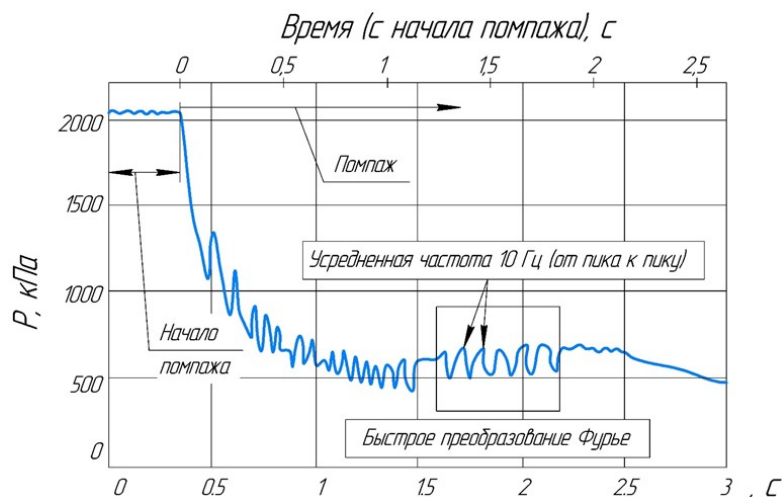


Рис. 5. Регистрация параметров при испытаниях по забросу вулканического пепла в двигатель PW F100 компании Calspan: изменение давления на выходе из компрессора [8]

В случае помпажа компрессора возможны серьезные механические поломки его лопаток. Повреждения были зафиксированы при испытаниях PW F100 (рис. 6).

Физический процесс аккумуляции вулканического пепла на лопатках турбины ГТД состоит из следующих последовательных этапов:

- попадание вулканического пепла в воздухозаборник двигателя с последующим прохождением компрессора и попаданием в рабочее пространство камеры сгорания;
- образование в камере сгорания жидкой фазы вулканического пепла вследствие того, что температура газов в камере сгорания существенно выше температуры ликвидуса вулканическо-



го пепла, температуры ликвидуса вулканического пепла достигают до 1400–1450 °С (пример определения температуры ликвидуса вулканического пепла методом нагревов образца представлен на рис. 7);

– перемещение расплавленных капель пепла вместе с газовым потоком к поверхности солового аппарата первой ступени;

– охлаждение и кристаллизация пепла на поверхности лопаток турбин, так как температура поверхности лопаток меньше температуры плавления и кристаллизации пепла.



Рис. 6. Повреждения рабочих лопаток девятой ступени компрессора двигателя PW F100 при испытаниях корпорации Calspan [8]

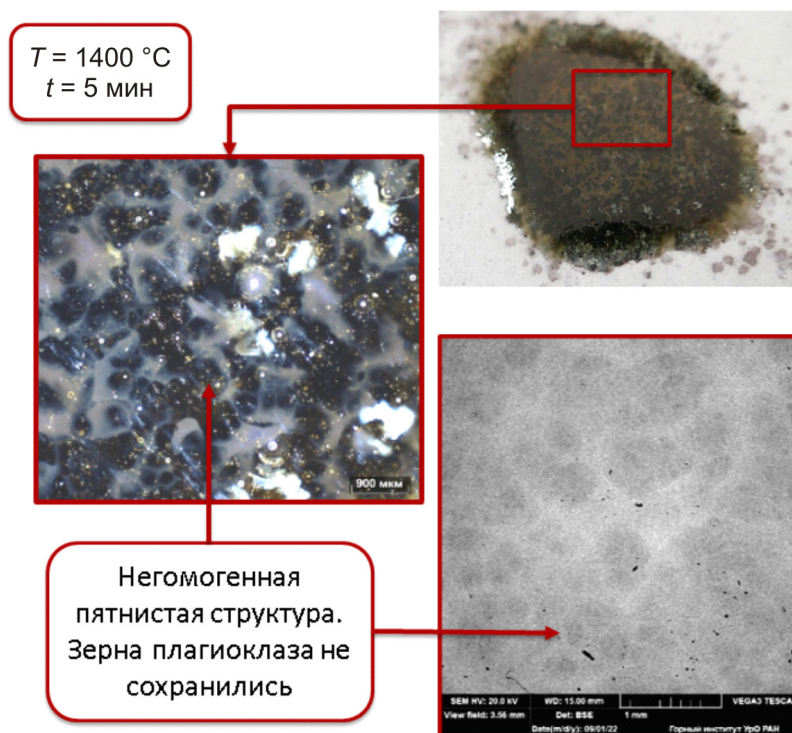


Рис. 7. Анализ температуры плавления образца вулканического пепла (фото Горного института УрО РАН и АО «ОДК-Авиадвигатель»)

Очевидно, что при увеличении времени нахождения самолета в облаке вулканического пепла, следовательно, и увеличении количества поглощенного пепла, увеличивается объем кристаллизовавшихся отложений на поверхности лопаток.

Во всех рассмотренных случаях наблюдались сопоставимые по форме и характеру отложения на лопатках сопловых аппаратов первой ступени турбины высокого давления. Сравнение отложений, снятых с первых сопловых лопаток при испытаниях двигателей PW F100 и RB211-524, показано на рис. 8.

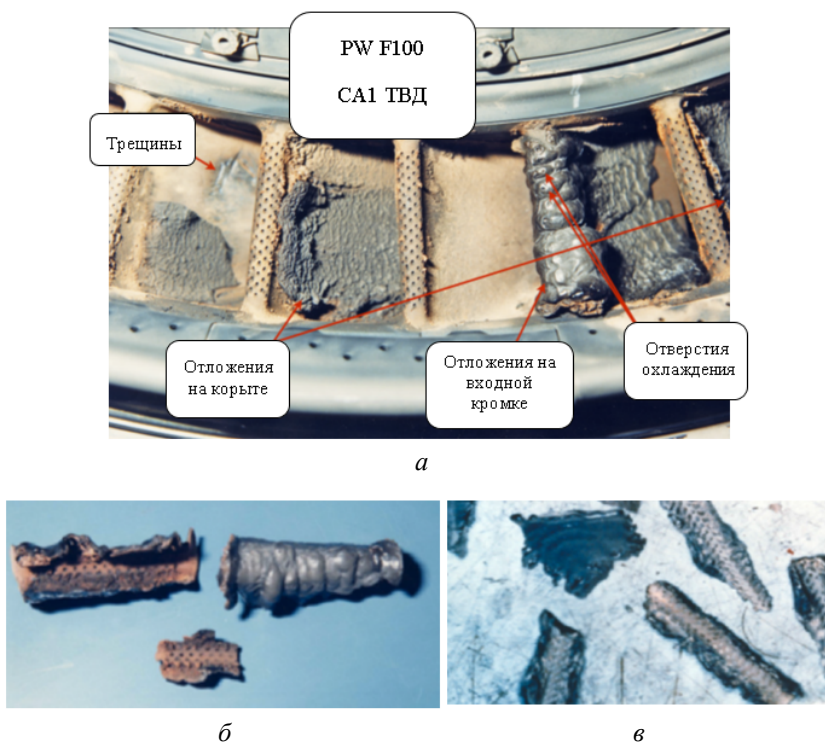


Рис. 8. Отложения на первых сопловых лопатках: *а* – PW F100 при испытаниях Calspan в результате воздействия 59,46 кг вулканического пепла на авиационный двигатель в течение 84,92 мин; *б* – снятые с лопаток PW F100 при испытаниях Calspan; *в* – снятые с лопаток RB211-524, попавшего в облако вулкана Галунггунг, 1982 г. [8]

Отложения пеплового материала на поверхностях лопаток турбины высокого давления уменьшают площадь проходного сечения в межлопаточных каналах (рис. 9). Особо опасным в данном случае будет появление отложений в межлопаточных каналах соплового аппарата первой ступени [11–13], так как достижение в нем критической скорости течения при меньших проходных сечениях приводит к дросселированию расхода воздуха через двигатель, и, как следствие, снижению запаса устойчивой работы компрессора, и помпажу.

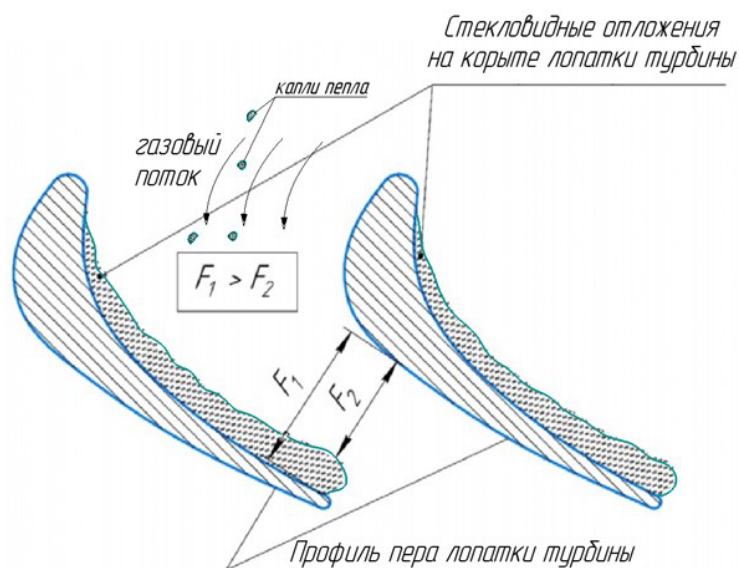


Рис. 9. Изменение площади проходного сечения при аккумуляции отложений на поверхностях лопаток турбины

В 2015 г. были введены сертификационные требования к восприимчивости конструктивных особенностей газотурбинного двигателя к воздействию вулканического пепла. Первым в мире двигателем, прошедшим сертификационные испытания по забросу вулканического пепла в соответствии с введенными нормами, является двигатель ПД-14 разработки АО «ОДК-Авиадвигатель».

При испытаниях газогенератора двигателя ПД-14 в ФАУ «ЦИАМ» использовался пепел вулкана Шивелуч, состав которого является репрезентативным по отношению к пеплу плинианских извержений, таких как известные катастрофические для авиации извержения вулканов Сент-Хеленс (1980 г.), Галунггунга (1982 г.), Редаут (1989 г.), Пинатубо (1991 г.). Структура частиц пепла вулкана Шивелуч показана на рис. 10. Сравнение химических составов и параметры образца пепла Шивелуч представлены в работе [14]. Испытания проводились при дозированной подаче пепла с концентрацией 4 мг/м<sup>3</sup> в течение 60 мин. Пробоподготовка пепла осуществлялась в Институте вулканологии и сейсмологии – Дальневосточном отделении Российской академии наук [15–19].

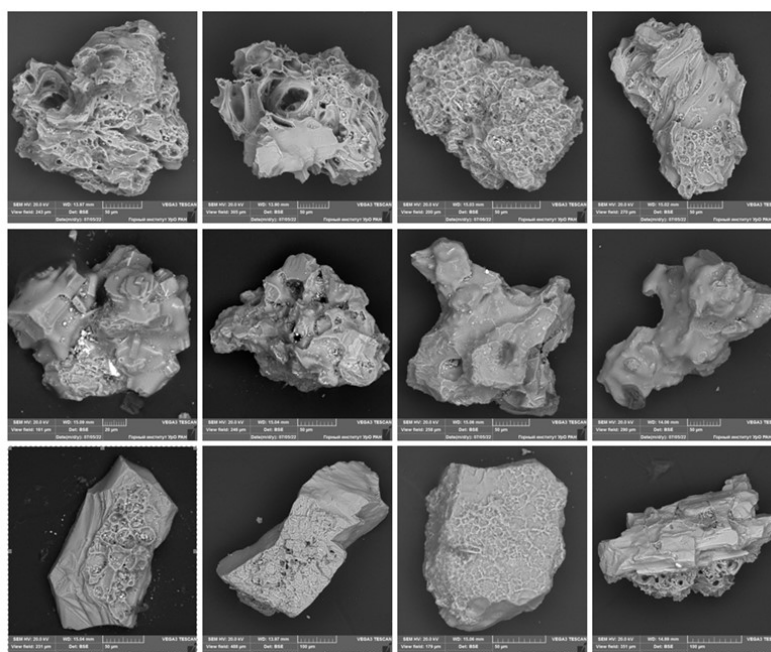


Рис. 10. Абразивная структура частиц пепла вулкана Шивелуч, Камчатка, РФ (тефра извержения 27 февраля 2005 г.). Фото Горного института УрО РАН

Стекловидные отложения, подобные описанным выше, были выявлены на всех сопловых и первой рабочей лопатках турбины высокого давления. Значительно большее количество отложений по сравнению с другими лопатками турбины высокого давления выявлено на первой сопловой (рис. 12): отмечены вытянутые стекловидные образования, получившиеся в результате растекания капель в направлении движения потока воздуха [14, 19].

Стекловидные отложения темно-коричневого цвета в виде агломератов размером до 0,5 мм обнаружены на лопатках турбины высокого давления, дефлекторах и теплозащитных панелях жаровой трубы камеры сгорания ПД-14. В местах наиболее интенсивного отложения частиц пепла на поверхности дефлекторов и теплозащитных панелей образовалась пленка толщиной до 0,5–0,6 мм [14, 19]. На поверхностях сопловых лопаток также наблюдались вытянутые стекловидные отложения. Описанные выше отложения представлены на рис. 11.

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 из вулканического стекла SiO<sub>2</sub> и минералов: роговая обманка Ca<sub>2</sub>(Mg,Fe,Al)<sub>5</sub>(Al,Si)<sub>8</sub>O<sub>22</sub>(OH)<sub>2</sub>, плагиок-

лазы (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  $\text{Fe}_2[\text{SiO}_4]$ ) [20].

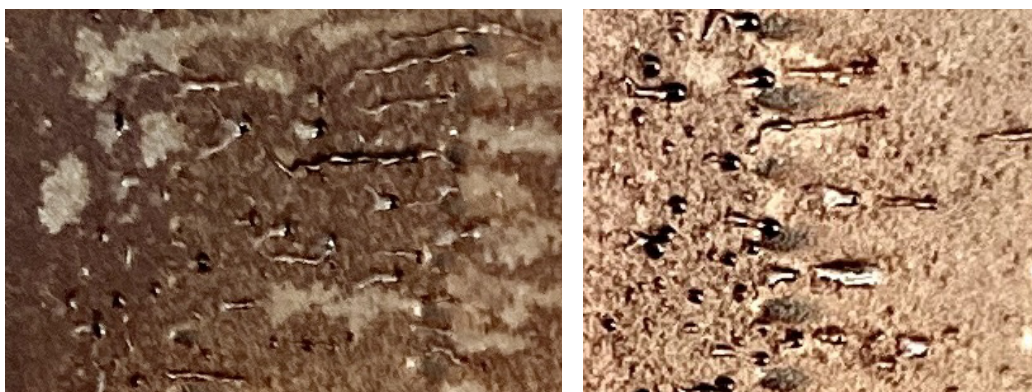


Рис. 11. Характер стекловидных отложений на сопловой лопатке первой ступени турбины

По результатам данной работы дальнейшим направлением исследований является разработка модели аккумуляции отложений пеплового материала на первых сопловых лопатках газовой турбины, также особое внимание должно быть уделено моделированию зон генерации жидкой фазы вулканического пепла в камере сгорания газотурбинного двигателя на разных режимах работы двигателя с учетом температурных параметров пепловых частиц.

### Заключение

Рассмотрены механизмы и последствия воздействия вулканического пепла на детали и сборочные единицы авиационного газотурбинного двигателя. Основными повреждениями двигателя являются: абразивно-эрозионный износ лопаток компрессора; формирование и аккумуляция отложений оплавленных частиц пепла на элементах камеры сгорания и лопатках турбины высокого давления. Также следует обратить внимание на засорение каналов системы охлаждения турбины; формирование углеродных отложений (нагара) на форсунках камеры сгорания; коррозию металлических деталей; загрязнение масляного и топливного контуров; повреждение электрических, гидравлических и пневматических систем.

Наиболее критичным последствием воздействия вулканического пепла на авиационные газотурбинные двигатели является формирование и аккумуляция стекловидных отложений на лопатках соплового аппарата первой ступени турбины. Аккумуляция стекловидных отложений на поверхности первого соплового аппарата может привести к критическому уменьшению площади проходного сечения и потере запаса газодинамической устойчивости.

Сопоставление данных зарубежных источников и результатов сертификационных испытаний ПД-14 по воздействию вулканического пепла показывает их сходных характер. Вместе с этим попадание в тракт двигателя ПД-14 рабочего тела с концентрацией вулканического пепла  $4 \text{ мг/м}^3$  в течение одного часа не приводит к снижению его тяговых характеристик и возникновению опасных связанных с двигателем последствий. Эрозия элементов двигателя ПД-14 от воздействия пепловых частиц отсутствует.

### Библиографический список

1. Flight Safety and Volcanic Ash // International civil aviation organization. – First edition. – 2012. – 46 p.
2. Characterisation of Dirt, Dust and Volcanic Ash: A Study on the Potential for Gas Turbine Engine Degradation / C.A. Wood, S.L Slater, M. Zonneveldt, J. Thornton, N. Armstrong, R.A. Antoniou. – Defence Science and Technology Group, Australia, May 2017. – 66 p.
3. Чехов, И.А. Особенности выполнения полетов в районах с вулканической деятельностью / И.А. Чехов // Наука и образование: проблемы, идеи, инновации. – 2019. – С. 80–84.



4. Заболотников, Г.В. Перспективы использования современных технологий при обеспечении полетов в зонах, подверженных влиянию вулканической деятельности / Г.В. Заболотников, О.Г. Богаткин // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. Метеорология. – 2016. – № 42. – С. 124–133.
5. Andesites of the 2009 eruption of Redoubt Volcano, Alaska / M.L. Coombs [et al.] // Journal of Volcanology and Geothermal Research. – 2013. – Vol. 259. – P. 349–372. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2012.01.002
6. Clarkson, R. Volcanic Ash Impacts on Jet Engines and Developments since 2010 / R. Clarkson. – Rolls-Royce (Aero Engines), 29th January 2019. – 23 p.
7. Deposition of volcanic materials in the hot sections of two gas turbine engines / J. Kim, M.G. Dunn, A.J. Baran [et al.] // ASME Journal of Eng Gas Turbine Power, 1993.
8. Davison, C.R. Assessment and Characterisation of Volcanic Ash Threat to Gas Turbine Engine Performance / C.R. Davison, T. Rutke // National Research Council Canada. – Ottawa, Canada, August, 2014.
9. MC-21 [Электронный ресурс] / Объединенная авиастроительная компания. – URL: <https://www.uacrussia.ru/ru/aircraft/lineup/civil/ms-21/> (дата обращения: 08.08.2023).
10. Dunn, M. Operation of Gas Turbine Engines in an Environment Contaminated With Volcanic Ash / M. Dunn // Journal of Turbomachinery. – 2012. – № 134. –P. 051001. DOI: 10.1115/1.4006236.
11. Попова, Д.Д. Воздействие вулканического пепла на авиационные газотурбинные двигатели / Д.Д. Попова, А.Н. Саженов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2022. – № 70. – С. 122–139.
12. Przedpelski, Z. Impact of Volcanic Ash from 15 December 1989 Redoubt Volcano Eruption on GE CF6-80C2 Turbofan Engines / Z. Przedpelski, Th. Casadevall // Proceedings of the First International Symposium on Volcanic.
13. Рысин, Л.С. Вулканический пепел – проблема для газотурбинных двигателей / Л.С. Рысин, М.Ф. Мокроус // Авиационные двигатели. – 2024. – № 1(22). – С. 5–10.
14. Исследование устойчивости авиационного двигателя ПД-14 к воздействию вулканического пепла / А.А. Иноземцев [и др.] // Вестник УГАТУ. – 2022. – Т. 26, №2 (96).
15. Гирина, О.А. Научно-технический отчет «Подготовка пепла вулканического происхождения для проведения испытаний по проверке его воздействия на работоспособность авиационного двигателя» / О.А. Гирина; ИВиС ДВО РАН. – 2020.
16. Камчатская группа реагирования на вулканические извержения (KVERT). [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/> (дата обращения: 11.04.2023).
17. Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. Новости. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.kscnet.ru/ivs/news/index.php> (дата обращения: 19.04.2023).
18. Активность вулканов Камчатки и Курильских островов в 2021 г. и их опасность для авиации / О.А. Гирина [и др.] // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXV ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога, 30–31 марта 2022 г. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2022. – С. 26–29.
19. Гирина, О.А. Проект KVERT – снижение вулканической опасности для авиации при эксплозивных извержениях вулканов Камчатки и Северных Курил / О.А. Гирина, Е.И. Гордеев // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. – 2007. – № 2. – С. 100–109.
20. Газогенератор двигателя ПД-14 успешно прошел испытания вулканическим пеплом / И.С. Павленков, А.А. Катаева, М.Д. Галлямов, С.В. Пестов // Информационно-технический бюллетень Пермские авиационные двигатели. – 2021. – № 48. – С. 30–33.

#### References

1. Flight Safety and Volcanic Ash. INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION, First edition, 2012, p. 46
2. Wood C.A., Slater S.L., Zonneveldt M., Thornton J., Armstrong N., Antoniou R.A. Characterisation of Dirt, Dust and Volcanic Ash: A Study on the Potential for Gas Turbine Engine Degradation. *Defence Science and Technology Group*, Australia, 2017, pp. 66
3. Chekhov I.A. Osobennosti vypolneniya poletov v rajonah s vulkanicheskoy deyatel'nost'yu // *Nauka i obrazovanie: problemy, idei, innovacii*, 2019, pp. 80–84.
4. Zabolotnikov G.V., Bogatkin O.G. Perspektivy` ispol'zovaniya sovremenny`x texnologij pri obespechenii poletov v zonax, podverzhenny`x vliyaniyu vulkanicheskoy deyatel`nosti. *Ucheny`e zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta. Meteorologiya*, 2016, no 42, pp. 124–133

5. Coombs M.L. et al. Andesites of the 2009 eruption of Redoubt Volcano, Alaska. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2013, vol. 259, pp. 349-372, DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2012.01.002
6. Clarkson R. Volcanic Ash Impacts on Jet Engines and Developments since. *Rolls-Royce (Aero Engines)*, 2010, 2019, p. 23.
7. Kim J., Dunn M.G., Baran A.J. et al. Deposition of volcanic materials in the hot sections of two gas turbine engines. *ASME Journal of Eng Gas Turbine Power*, 1993.
8. Davison C.R., Rutke T. Assessment and characterisation of volcanic ash threat to gas turbine engine performance. *National Research Council Canada*. Ottawa, Canada, 2014.
9. MS-21. *United Engine Corporation*, available at: <https://www.uacrussia.ru/aircraft/lineup/civil/ms-21/> (08.08.2023) (accessed 8 August 2024)
10. Dunn M. Operation of gas turbine engines in an environment contaminated with volcanic ash. *Journal of Turbomachinery*, 2012, no. 134, pp. 051001, DOI: 10.1115/1.4006236
11. Popova D.D., Sazhenkov A.N. Effects of volcanic ash on aircraft gas turbine engines. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2022, no. 70, pp. 122-139. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.70.12
12. 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*, 1989
13. Rysin L.S., Mokrousov M.F. Vulkanicheskiy pepel – problema dlya gazoturbinnih dvigatelej. *Aviacionnyh dvigateli*, 2024, no 1(22), pp. 5-10
14. Inozemcev A.A. et al. Issledovanie ustojchivosti aviacionnogo dvigatelya PD-14 k vozdeystviyu vulkanicheskogo pepela. *Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University)*, 2022, vol. 26, no. 2 (96), pp. 60-70
15. Girina O.A. Nauchno-tehnicheskij otchet «Podgotovka pepela vulkanicheskogo proiskhozhdeniya dlya provedeniya ispytaniy po proverke ego vozdeystviya na rabotosposobnost' aviacionnogo dvigatelya». *Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS*, 2020
16. Kamchatka Volcanic Eruption Response Team (KVERT). available at: <http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/> (11.04.2023) (accessed 11 April 2024)
17. Institut vulkanologii i sejsmologii DVO RAN. Novosti, available at: <http://www.kscnet.ru/ivs/news/index.php> (accessed 19 April 2023)
18. Girina O.A et al. Aktivnost' vulkanov Kamchatki i Kuril'skix ostrovov v 2021 g. i ix opasnost' dlya aviacii. *Vulkanizm i svyazanny'e s nim processy'. Materialy` XXV ezhegodnoj nauchnoj konferencii, posvyashhyonnoj Dnyu vulkanologa*, Petropavlovsk-Kamchatskiy, p. 26-29, 2022
19. Girina O.A., Gordeev E.I. 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*, 2007, no. 2, pp. 100-109
20. Pavlecov I.S., Kataeva A.A., Gallyamov M.D., Pestov S.V. Gazogenerator dvigatelya PD-14 uspeshno proshel ispytaniya vulkanicheskim peplom. *Informacionno-tehnicheskij byulleten' Permskie aviacionnye dvigateli*, 2021, no 48, pp. 30-33.

#### Об авторах

**Попова Диана Дмитриевна** (Пермь, Российская Федерация) – инженер, ОДК-Авиадвигатель (614990, Пермь, Комсомольский пр., 93); аспирант кафедры «Авиационные двигатели», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: [popova-dd@avid.ru](mailto:popova-dd@avid.ru)).

**Саженов Алексей Николаевич** (Пермь, Российская Федерация) – кандидат технических наук, помощник управляющего директора, ОДК-Авиадвигатель (614990, Пермь, Комсомольский пр., 93, e-mail: [office@avid.ru](mailto:office@avid.ru)).

#### About the authors

**Diana D. Popova** (Perm, Russian Federation) – Engineer, UEC-Aviadvigatel (93, Komsomolsky av., 614990, Perm); Postgraduate Student of the Department of Aircraft Engines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, e-mail: [popova-dd@avid.ru](mailto:popova-dd@avid.ru)).

**Aleksey N. Sazhenkov** (Perm, Russian Federation) – Candidate of Technical Sciences, Assistant to the Managing Director, UEC-Aviadvigatel (93, Komsomolsky av., 614990, Perm, e-mail: [office@avid.ru](mailto:office@avid.ru)).

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов.** Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Поступила: 16.07.2024

Одобрена: 21.10.2024

Принята к публикации: 31.10.2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Попова, Д.Д. О воздействии вулканов на работу газотурбинных двигателей / Д.Д. Попова, А.Н. Саженов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2024. – № 78. – С. 14–24. DOI: 10.15593/2224-9982/2024.78.02

Please cite this article in English as: Popova D.D., Sazhenkov A.N. Volcano impact on the gas turbine engines operation. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2024, no. 78, pp. 14-24. DOI: 10.15593/2224-9982/2024.78.02