

УДК 629.7.036.3

DOI: 10.15593/2224-9982/2022.70.12

Д.Д. Попова^{1,2}, А.Н. Саженов¹

¹ОДК-Авиадвигатель, Пермь, Россия

²Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

ВОЗДЕЙСТВИЕ ВУЛКАНИЧЕСКОГО ПЕПЛА НА АВИАЦИОННЫЕ ГАЗОТУРБИННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Облака вулканического пепла, выбрасываемые в атмосферу Земли более чем тысячей действующих вулканов, представляют собой непосредственную серьезную угрозу для безопасности полетов, так как частицы вулканического пепла в больших концентрациях могут вызывать значительные повреждения авиационной техники.

В данной статье представлены последствия попадания летательного аппарата в облако вулканического пепла (повреждения фюзеляжа и аэродинамических поверхностей самолета, турбореактивных маршевых двигателей, антенн, приемников воздушного давления и температуры, других систем летательного аппарата), также подробно описаны механизмы и примеры воздействия вулканического пепла на различные типы авиационных газотурбинных двигателей. Приведена обобщенная статистика попаданий летательных аппаратов в облака вулканического пепла с 1935 по 2021 гг.

Рассмотрены результаты инженерных испытаний двухконтурных газотурбинных двигателей PWF100 при воздействии вулканического пепла в условиях научно-технической компании Calspan Corporation, основанной в 1943 г. в Соединенных Штатах Америки. Также представлены результаты работ по программе Национального аэрокосмического агентства Соединенных Штатов Америки (NASA) «VIPR (Vehicle Integrated Propulsion Research)» по комплексному исследованию воздействия вулканического пепла на силовую установку F-117 (PW2040) военно-транспортного самолета Boeing C-17 Globemaster III. Результаты исследований национального агентства NASA и корпорации Calspan Corporation сопоставлены с основными данными сертификационных испытаний перспективного авиационного газотурбинного двигателя ПД-14 разработки компании АО «ОДК-Авиадвигатель» в условиях закрытого наземного стенда Ц-17Т ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова» согласно требованиям европейского агентства по авиационной безопасности EASA.

Ключевые слова: вулканический пепел, авиационный газотурбинный двигатель, камера сгорания, турбина, сопловые лопатки турбины, эрозия, засорение отверстий охлаждения, стеклование, помпаж, андезит.

D.D. Popova^{1,2}, A.N. Sazhenkov¹

¹UEC-Aviadvigatel, Perm, Russia Federation

²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

EFFECTS OF VOLCANIC ASH ON AIRCRAFT GAS TURBINE ENGINES

Volcanic ash clouds emitted into the Earth's atmosphere by more than a thousand active volcanoes pose an immediate serious threat to flight safety, since volcanic ash particles in high concentrations can cause significant damage to aircraft.

This article presents the consequences of an aircraft getting into a cloud of volcanic ash (damage to the fuselage and aerodynamic surfaces of the aircraft, turbojet sustainer engines, antennas, air pressure and temperature receivers, other aircraft systems), and also describes in detail the mechanisms and examples of the impact of volcanic ash on various types aircraft gas turbine engines. The global statistics of aircraft hitting volcanic ash clouds from 1935 to 2021 is given.

The results of engineering tests of PW F100 bypass gas turbine engines under the influence of volcanic ash in the conditions of the scientific and Calspan Technical Corporation, founded in 1943 in the United States of America, are considered. Also presented are the results of work under the VIPR (Vehicle Integrated Propulsion Research) program of the National Aerospace Agency of the United States of America (NASA) for a comprehensive study of the impact of volcanic ash on the F-117 (PW2040) power plant of the Boeing C-17 Globemaster III military transport aircraft. The results of research by the NASA national agency and the Calspan Corporation are compared with the main data of certification tests of the advanced PD-14 aircraft gas turbine engine developed by JSC «UEC-Aviadvigatel» in the conditions of the closed ground test facility Ts-17T of the FAA «CIAM named after P.I. Baranov» in accordance with the requirements of the European Aviation Safety Agency (EASA).

Keywords: volcanic ash, aircraft gas turbine engine, combustion chamber, turbine, turbine nozzle blades, erosion, cooling holes clogging, glass transition, surge, andesite.

Загрязнение атмосферы вулканическим пеплом в условиях глобального роста мировых авиаперевозок является вызовом для безопасности полетов.

Вулканический пепел, являясь чрезвычайно абразивным материалом (рис. 1), может нанести урон фюзеляжу и аэродинамическим поверхностям самолета, турбореактивным маршевым двигателям, антеннам, приемникам воздушного давления и температуры, другим системам летательного аппарата и даже вывести эти системы из строя. Кроме того, в результате абразивного воздействия пепла на лобовые стекла кабины экипажа возможна потеря их прозрачности (помутнение), что затрудняет визуальный обзор во время посадки.

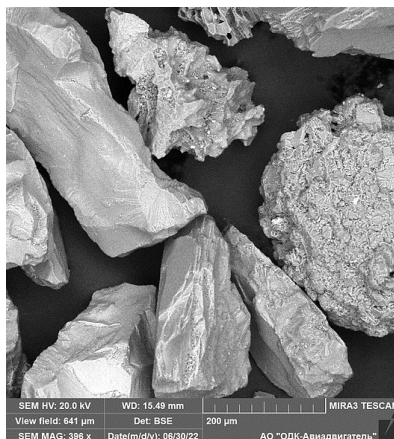


Рис. 1. Абразивная структура частиц пепла вулкана Шивелуч, Камчатка, РФ (тефра извержения 27 февраля 2005 г.)

При полете самолета в вулканическом облаке возможно попадание ядовитых газов в салон и кабину экипажа через воздушную систему кондиционирования, что также может оказать негативное влияние на безопасность полета.

Вследствие трения частиц пепла о поверхность самолета возможно появление электростатических разрядов и свечение «огней святого Эльма». В совокупности с потерей газодинамической устойчивости турбомашин, сопровождающейся низкочастотными выбросами пламени камеры сгорания (7...20 Гц), это может оказать дополнительное негативное психоэмоциональное воздействие на пассажиров и экипаж.

18 мая 1980 г. через несколько часов после начала катастрофического извержения вулкана Сент-Хеленс (США) ближнемагистральный самолет DC-9-30, оснащенный двумя турбореактивными двигателями Pratt & Whitney JT8D, попал в пепловое облако на высоте 10 700 м. Воздействию подверглись компрессоры и турбины двигателей, загрязненной оказалась маслосистема, имело место короткое замыкание электрических систем, хотя самолет находился в пепловом облаке всего четыре минуты.

Через неделю, 25 мая 1980 г., произошло еще одно извержение вулкана Сент-Хеленс, который выбросил в атмосферу в тот день 14 км³ пепла, осевшего в 11 штатах США и двух провинциях Канады. В результате военно-транспортный самолет Lockheed C-130 Hercules, оснащенный четырьмя турбовинтовыми двигателями Allison T56, оказался в плотном пепловом облаке на 3–4 мин. Этот контакт едва не закончился катастрофой. Два двигателя из четырех стали работать с перебоями, а затем произошло их выключение; два других двигателя работали на пониженных оборотах. При разборке машин было выявлено, что у двух двигателей турбины полностью разрушены, а у двух других пришлось заменить компрессоры.

Всего в мае–июне 1980 г. было зафиксировано восемь контактов самолетов с вулканическим облаком от Сент-Хеленс. Данные инциденты стали первым серьезным предупреждением об опасности пеплового загрязнения, когда воздействие на самолет и его газотурбинные двигатели может оказаться комплексным и всесторонним (рис. 2).



а



б

Рис. 2. *а* – извержение вулкана Сент-Хеленс 18 мая 1980 г.; *б* – клубы пепла от вулкана Сент-Хеленс над аэропортом Эфрата в штате Вашингтон

24 июня 1982 г. мировое авиационное сообщество узнало о драматическом событии, когда произошел отказ всех четырех двигателей дальнемагистрального широкофюзеляжного самолета Boeing 747-236В после его попадания в свежий столб вулканического пепла, выброшенного вулканом Галунггунг на острове Ява (Индонезия). За последующие 16 мин воздушное судно снизилось при неработающих двигателях с высоты 11 300 до 3650 м и сумело выйти из вулканического облака. В этот момент экипаж смог перезапустить три двигателя и благополучно посадить самолёт. Никто (из находившихся на его борту 263 человек – 248 пассажиров и 15 членов экипажа) не пострадал.

В этот день от вулкана Галунггунг пострадал еще один самолет Boeing 747, при этом имело место выключение трех из четырех двигателей.

Все последующие случаи попадания авиационной техники в облако вулканического пепла убедительно показывают, что безопасность полета в таких ситуациях во многом связана с надежной и устойчивой работой маршевых авиационных двигателей летательного аппарата, а все эксплуатационные меры при попадании в облако направлены главным образом на сохранение работоспособности двигателей [1, 2].

Безусловно, исследование влияния пепла на работу самолетов и их силовых установок, ввиду содержательности проблемы и обилия статистического материала, достойно отдельной монографии. Однако ясно, что и допоявления таких фундаментальных трудов очень актуальными являются научные исследования и дискуссии применительно к созданию современной российской авиатехники. В этой связи цель настоящей статьи состоит в том, чтобы описать наиболее значимые события, связанные с попаданием самолетов в облако вулканического пепла, проанализировать механизмы наиболее критического воздействия пепла на элементы авиационного газотурбинного двигателя, проецируя их на российские условия.

Воздействие вулканического пепла на воздушное судно

Работа в условиях запыленной вулканическим пеплом среды приводит к повреждению множества элементов воздушного судна (рис. 3). Вследствие того что пепел является абразивным материалом, согласно данным Международной организации гражданской авиации (ИКАО), могут ожидать следующие события [1]:

- засорение датчиков и систем измерения;
- эрозия внешних элементов воздушного судна;
- загрязнение систем кондиционирования и герметизации;
- отказ одного или нескольких двигателей и их неустойчивая работа.

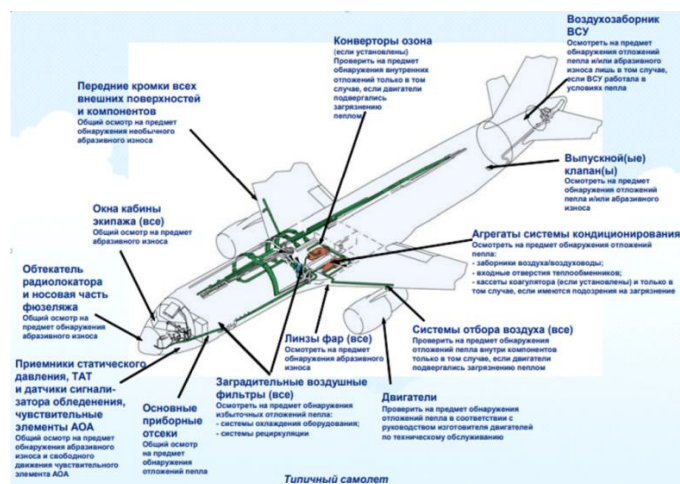


Рис. 3. Воздействие вулканического пепла на элементы летательного аппарата

Одним из наиболее опасных повреждений газотурбинных двигателей является эрозионно-абразивный износ лопаток компрессора, а также формирование стекловидных отложений на деталях и сборочных единицах «горячей части» двигателя, прежде всего на сопловых лопатках первой ступени турбины высокого давления, которые могут привести к непрекращающимся помпам компрессора и потере тяги двигателя [3]. Механизмы этих повреждений будут ниже подробно рассмотрены.

Международная организация ИКАО опубликовала индекс тяжести последствий при попадании в облако вулканического пепла. Индекс варьируется от нуля, когда воздушное судно не подвержено влиянию пепла, до пяти, когда повреждение является критическим (табл. 1). Повреждение и полный или временный отказ двигателя относятся к ситуациям с **большим** индексом (максимальной опасностью для летательного аппарата), а абразивные повреждения фюзеляжа, запыленность и снижение видимости являются менее опасными для полета [4–6].

Таблица 1

Индекс тяжести последствий при попадании в облако пепла

Критерий	
0	Едкий запах в салоне; электростатический разряд («огни святого Эльма»)
1	Легкая запыленность в салоне; кислород для дыхания не используется
2	Высокая запыленность в кабине; загрязнение систем кондиционирования воздуха (требуется кислород); абразивные повреждения и отложения пепла в двигателе
3	Неустойчивый режим работы двигателя и его повреждение
4	Временный отказ двигателя, требующий перезапуска в полете
5	Отказ двигателя или другое повреждение, повлекшее аварию

В руководстве ИКАО по облакам вулканического пепла, радиоактивных материалов и токсических химических веществ [1] предоставлены сводные данные о контактах воздушных судов с вулканическим пеплом с 1935 по 2008 гг. Оценена тяжесть последствий каждого контакта, определены источник вулканического извержения, дата извержения и контакта, а также тип воздушного судна. Максимальное количество событий произошло в 1991 г. в связи с извержениями вулкана Пинатубо на Филиппинах (18 событий) и вулканов Сакурадзима и Ундзен в Японии (4 события), имели место события с индексом тяжести, равным 4. В фундаментальном исследовании М. Гуффанти и её коллег [7] приведены распределения инцидентов попаданий самолетов в облако вулканического пепла по индексу тяжести, местоположению, типу воздушного судна. Выяснено, что в 56 % событий индекс тяжести равен 2, что подразумевает абразивные повреждения и отложения пепла в двигателе. Повреждения двигателей случаются примерно в 79 % случаев полета в облаке вулканического пепла (2–4-й индексы тяжести). Большую опасность для авиации представляют вулканы Галунггунг (всего пять случаев, индекс тяжести 2–4) и Редаут (всего шесть случаев, в четырех случаях индекс тяжести выше 2).

В работе М. Гуффанти представлена и статистика попаданий самолетов в облака вулканического пепла, а также данные о повреждениях летательных аппаратов и их силовых установок за период с 1953 по 2009 гг. В исследовании К. Кристманн [8] содержится статистика попаданий самолетов в облака вулканического пепла за период с 2010 по 2016 гг.

Исходя из исследований [1, 9, 10] и собственных поисков, установлено, что с 1935 по 2021 гг. зарегистрировано 156 инцидентов подтвержденных столкновений с пеплом, причем 101 из них характеризуется различной степенью повреждения планера или двигателя. В 36 случаях повреждения двигателей и/или планера были от значительных до очень тяжелых, в том числе выключение двигателей в полете в десяти случаях. На рис. 4 показаны все случаи (из этих исследований) попадания самолета в облако вулканического пепла, отдельно отмечены случаи с высоким индексом тяжести (выше 3). За все годы исследования не было зарегистрировано ни одного случая с индексом тяжести, равным 5. Сведения о контактах воздушных судов собаками вулканического пепла четвертого индекса тяжести (с выключением двигателей) представлены в табл. 2. Статистические данные о попадании самолетов в облако пепла после 2016 г. в научных публикациях и материалах ИКАО нами найдены не были. Данные по статистике за последние 5–7 лет нуждаются в дополнительном подтверждении.

Таблица 2

Сводные данные о контактах самолетов с вулканическим пеплом,
повлекших выключение двигателей

№ п/п	Вулкан	Дата контакта	Тип воздушного судна / двигатель	Продолжительность контакта	Количество отказавших двигателей
1	Сент-Хеленс, США	25.05.1980	C-130/ Garrett TFE731-3	≈ 4 мин	2 из 4
2	Галунггунг, Индонезия	24.06.1982	Boeing 747-236B / RB211-524D4	13 мин	4 из 4
3	Галунггунг, Индонезия	24.06.1982	Boeing 747/ RB211-524D4	Неизвестно	3 из 4
4	Галунггунг, Индонезия	13.07.1982	Boeing 747-200B/ RB211-524D4	Неизвестно	3 из 4 (оставшийся на режиме малого газа)
5	Редаут, США	15.12.1989	Boeing 747-400 / CF6-80C2	≈ 8 мин	4 из 4
6	Пинатубо, Филиппины	17.06.1991	Boeing 747-200B/ RB211-524D4	2 мин	2 из 4

Окончание табл. 2

№ п/п	Вулкан	Дата контакта	Тип воздушного судна/двигатель	Продолжительность контакта	Количество отказавших двигателей
7	Пинатубо, Филиппины	17.06.1991	DC-10/ GE CF6-6D	Неизвестно	3 из 3
8	Ундзэн, Япония	27.06.1991	DC-10/ GE CF6-6D	Неизвестно	2 из 3
9	Суфриер-Хиллс, Великобритания	27.07.2001	Boeing 747-400/ CF6-80C2	Неизвестно	1 из 2
10	Манама, Папуа – Новая Гвинея	17.07.2006	Gulfstream II/ Spey Mk 511-8	7 мин	2 из 2

Практически все случаи с индексом тяжести «4» произошли с дальнемагистральными самолетами.

По результатам анализа причин выключения двигателей в 80-х гг. аэронавигационная комиссия ICAO пришла к мнению о том, что необходим оперативный механизм и служба оповещения воздушных судов о выбросах вулканического пепла. И такая служба слежения за вулканической деятельностью на международных авиатрассах IAVW (International airways volcano watch) была создана ICAO в 1987 г. Служба слежения за вулканической деятельностью на международных авиатрассах IAVW основана на сотрудничестве авиационных и неавиационных оперативных подразделений, использующих информацию, полученную из источников и по сетям наблюдений, которые предоставляются государствами. Слежение координируется ICAO в тесном взаимодействии с другими соответствующими международными организациями.

Представленные в табл. 2 данные наглядно показывают, что, несмотря на глобальный рост мировых авиаперевозок и сохранение вулканической активности на прежнем уровне, количество опасных контактов с вулканическим пеплом в полете (с индексом тяжести «4») за последние 16 лет уменьшилось до нуля. Такая тенденция наиболее вероятно связана с неукоснительным выполнением рекомендованных ICAO мер по уменьшению воздействия вулканического пепла на летательный аппарат, введением мониторинга вулканической активности службой слежения за вулканической деятельностью, закрытием воздушного пространства во время извержений, как это было сделано в 2010 г. после извержения вулкана Эйяфьядлайёкюдль.

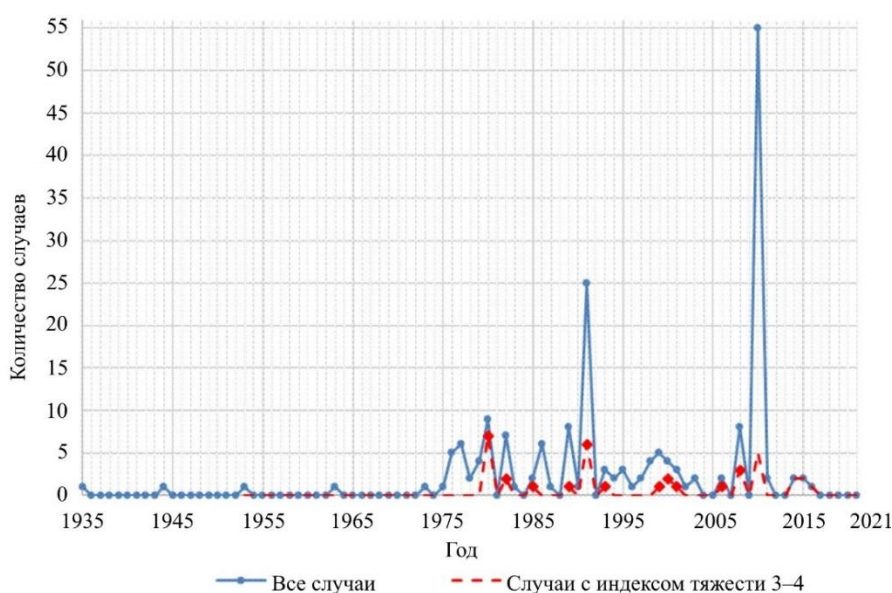


Рис. 4. Статистика попаданий летательных аппаратов в облака вулканического пепла

В России вулканологическая опасность связана главным образом с деятельностью вулканов, образовавшихся в области столкновения Тихоокеанской и Евразийской литосферных плит, которой принадлежат действующие вулканы на Камчатке и Курильских островах. С целью мониторинга вулканов Камчатки и Северных Курил для предупреждения авиакомпаний и прочих заинтересованных организаций с 1993 г. развернут проект KVERT (Kamchatkan Volcanic Eruption Response Team Камчатская группа реагирования на вулканические извержения) в сотрудничестве с Камчатским филиалом Геофизической службы РАН, Аляскинской вулканологической обсерваторией и геологической и геофизической службами США. Благодаря деятельности данного проекта летом 2017 г. было приостановлено авиасообщение с Камчаткой всвязи с вулканической активностью вулканов Шивелуч и Ключевской [11, 12].

Воздействие вулканического пепла на элементы авиационного газотурбинного двигателя

Основными проявлениями воздействия вулканического пепла на элементы (ГТД) являются:

- эрозионно-абразивные повреждения элементов ГТД (компрессора, лопаток турбины низкого давления);
- засорение топливных форсунок;
- аккумуляция отложений пеплового материала на элементах камеры сгорания и лопатках турбины высокого давления и ее последствия.

В настоящем разделе данной статьи описаны основные механизмы воздействия вулканического пепла на элементы газогенератора авиационного газотурбинного двигателя на примере реальных случаев попадания в облако вулканического пепла и инженерных испытаний, приведено сравнение накопленного опыта с первыми в мире сертификационными испытаниями двигателя ПД-14 на попадание в его тракт вулканического пепла по нормам EASA.

Воздействие вулканического пепла на компрессор газотурбинного двигателя

Механизмы воздействия вулканического пепла на авиационный двигатель впервые были комплексно рассмотрены в ранее засекреченных испытаниях корпорации Calspan, США. Данные испытания явились первичной всесторонней оценкой с известными условиями (временем воздействия и концентрацией пепла). В рамках данной статьи предлагается рассмотреть механизмы воздействия на примере данных испытаний и реальных случаев попадания летательного аппарата в облако вулканического пепла.

Важным первичным видимым диагностическим признаком попадания самолета в облако вулканического пепла являются «огни святого Эльма». Данное явление представляет собой белое свечение, идентифицируемое невооруженным глазом в виде «луча прожектора» из воздухозаборника при концентрациях вулканического пепла выше 40 мг/м^3 . Именно такое явление впервые увидели пилот и бортинженер 24 июня 1982 г., когда самолет Boeing 747-236В попал в облако вулканического пепла над островом Ява. Явление «огней святого Эльма» было воспроизведено во время первых испытаний на попадание вулканического пепла в авиационный газотурбинный двигатель, проводимых корпорацией Calspan (рис. 5; представленное свечение имеет желтый оттенок вследствие технических причин, связанных с фотофиксирующим оборудованием) [13].

Ключевым механизмом повреждения компрессора является абразивно-эрозионный износ лопаток компрессора. Так, в результате длительного удара твердых частиц пепла по профилю лопатки компрессора возможно существенное изменение её формы и контуров (конфигурации), подобно воздействию чрезмерно запыленной атмосферы на лопатки вертолетного двигателя в условиях пустыни. На рис. 6 показаны последствия эрозионного износа лопаток компрессора высокого давления двухконтурного двигателя PWF100, полученные во время испытаний корпорации Calspan при повышенной концентрации вулканического пепла (заброс $59,46 \text{ кг}$ в течение 85 мин). Отчетливо видно утончение торцевого профиля лопатки компрессора четвертой ступени. След-

ствием подобных повреждений в целом является появление вихревых и обратных токов, когда сжатый в корневой части ступени воздух перетекает на вход в ступень, что в конечном итоге снижает запас газодинамической устойчивости компрессора, его напорность, ухудшает работоспособность двигателя в целом.

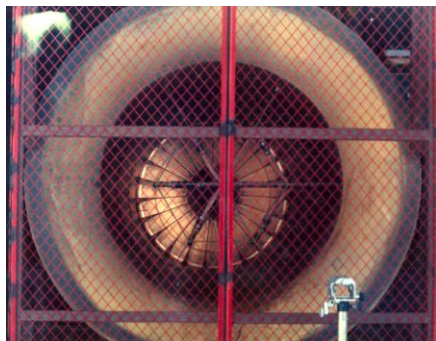


Рис. 5. «Огни Святого Эльма» на входе в двигатель [12]

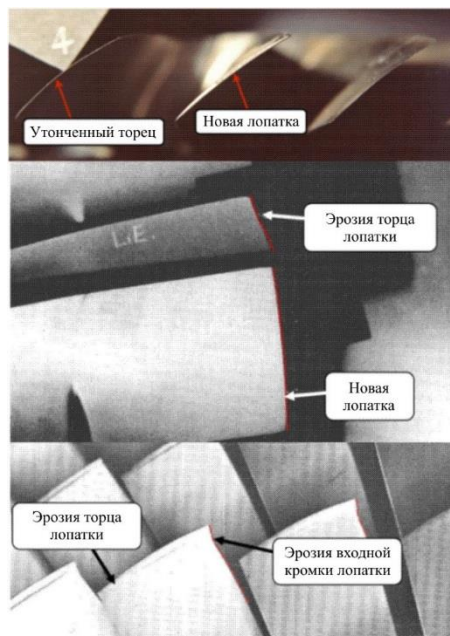


Рис. 6. Эрозия лопаток компрессора вследствие попадания вулканического пепла в тракт ГТД [12]

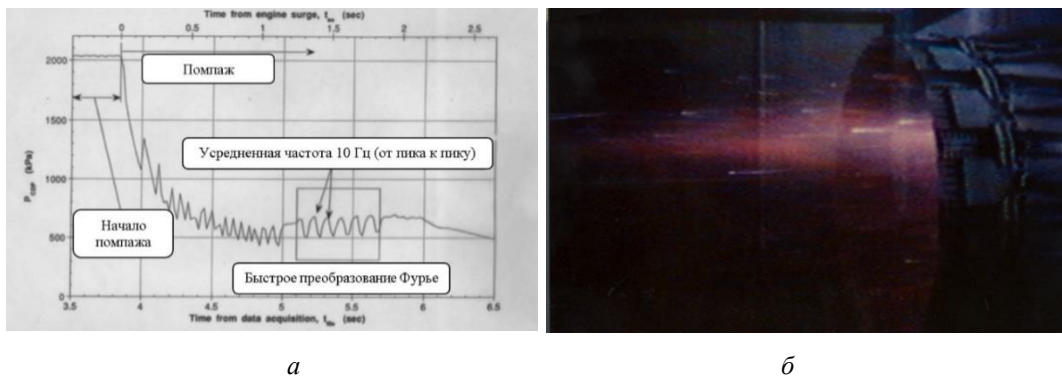
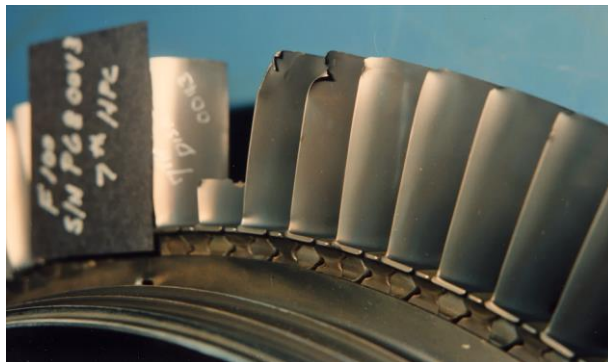


Рис. 7. Регистрация параметров при испытаниях по забросу вулканического пепла в двигатель PWF100 компании Calspan: *а* – изменение давления на выходе из компрессора; *б* – фотофиксация потока на выходе из двигателя при помпаже [13]

При испытаниях корпорации Calspan двигателей PWF100 регистрировалась динамика изменения давления на выходе из компрессора, а также велась съемка газового потока на выходе из двигателя (рис. 7). В данных испытаниях происходил помпаж двигателей при концентрации 500 мг/м^3 .

В случае помпажа компрессора возможны серьезные механические поломки его лопаток. Такие повреждения, например, были зафиксированы при испытаниях двигателей PWF100 (рис. 8), что свидетельствует, с одной стороны, о наличии пластических деформаций в процессе колебаний лопаток, приводящих к их поломке по механизму малоциклового усталости, а с другой – об отсутствии на PWF100 автоматической системы защиты двигателя от помпажа.



а



б

Рис. 8. Повреждения лопаток компрессора двигателя PWF100 при испытаниях корпорации Calspan: а – 7-я ступень; б – 9-я ступень [13]

Так, судя по осциллограмме, видно, что продолжительность помпажа PWF100 составила более 1,5 с и было допущено более 20 помпажных колебаний давления. Для сравнения: на двигателях ПС-90А и ПД-14 разработки АО «ОДК-Авиадвигатель» помпаж автоматически выявляется и устраняется за время не более 0,08 с, при этом допускается 1–2 помпажных колебания давления воздуха за компрессором, не более.

Испытания на воздействие вулканического пепла проводятся при создании современных российских двигателей, на данный момент газогенератор двигателя разработки АО «ОДК-Авиадвигатель» ПД-14 прошел полные инженерные испытания на попадание вулканического пепла. Эрозия элементов при сертификационных испытаниях ПД-14 при дозированном подходе, имитирующем концентрацию пепла 4 мг/м^3 , отсутствует. Элементы компрессора не повреждены.

Воздействие вулканического пепла на камеру сгорания и турбину газотурбинного двигателя

При эксплуатации ГТД в сильно загрязненном вулканическим пеплом воздухе наиболее тяжелыми по последствиям являются повреждения, связанные с отложением оплавленных частиц пепла на узлах горячей части двигателя, главным образом на сопловом аппарате первой ступени турбины и элементах камеры сгорания. В частности, многочисленные стекловидные отложения пепла на сопловом аппарате турбины приводят к существенному снижению площади проходного

сечения и, как следствие, к непрекращающимся помпам компрессора и выключению двигателя в полете.

В результате воздействия 59,46 кг вулканического пепла на авиационный двигатель в течение 84,92 мин в рамках испытаний Calspan было отмечено появление углеродных отложений на топливных форсунках в виде черного нагара (рис. 9). Данные отложения не засорили центральных отверстий подачи топлива, однако оседание материала на форсунках значительно ухудшило качество распыла топлива.

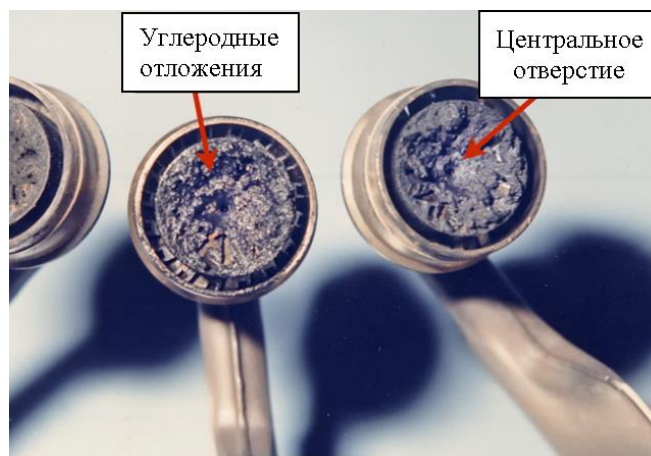


Рис. 9. Углеродные отложения на форсунках двигателя PWF100 при испытаниях Calspan

Одним из самых опасных (индекс тяжести последствий «4» по критериям ICAO) зарегистрированных коммерческих полетов в облаке вулканического пепла является рейс компании British Airways Boeing 747, оснащенный четырьмя двигателями Rolls-Royce RB211-524D4, в 1982 г. возле города Галунггунг в Индонезии. В данном инциденте были зафиксированы выключения всех четырех двигателей самолета, после приземления двигатели были демонтированы и отправлены в Великобританию. При обследовании выяснилось, что все они были повреждены абразивными материалами, которые представляли собой частицы вулканического пепла от извержения вулкана Галунггунг, также были отмечены пепельные отложения на горячей части двигателя. На рис. 10, а представлены отложения пепла на первом сопловом аппарате турбины двигателя Rolls-Royce RB211-524D4.

Другой самолет, Boeing 747-400, на Аляске в 1989 г. при снижении на высоте 7500 м попал в облако пепла от вулкана Редаут, извержение которого произошло за полтора часа до этого (рис. 10, б, в). Произошло также выключение всех четырех двигателей типа General Electric CF6-80C2 в течение первых 80 с полета в облаке пепла. Только спустя 8 мин, когда до земли оставалось 2000 м, пилотам удалось запустить два двигателя, и самолет благополучно приземлился в Анкоридже [13, 1].

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

Физический смысл аккумуляции заключается в постепенном накоплении кристаллизованных из жидкой фазы отложений при увеличении времени нахождения в облаке вулканического пепла, следовательно, и увеличении количества поглощенного вулканического пепла. Объемы зон генерации жидкой фазы вулканического пепла и их расчет на примере ПД-14 показаны в работе [15].

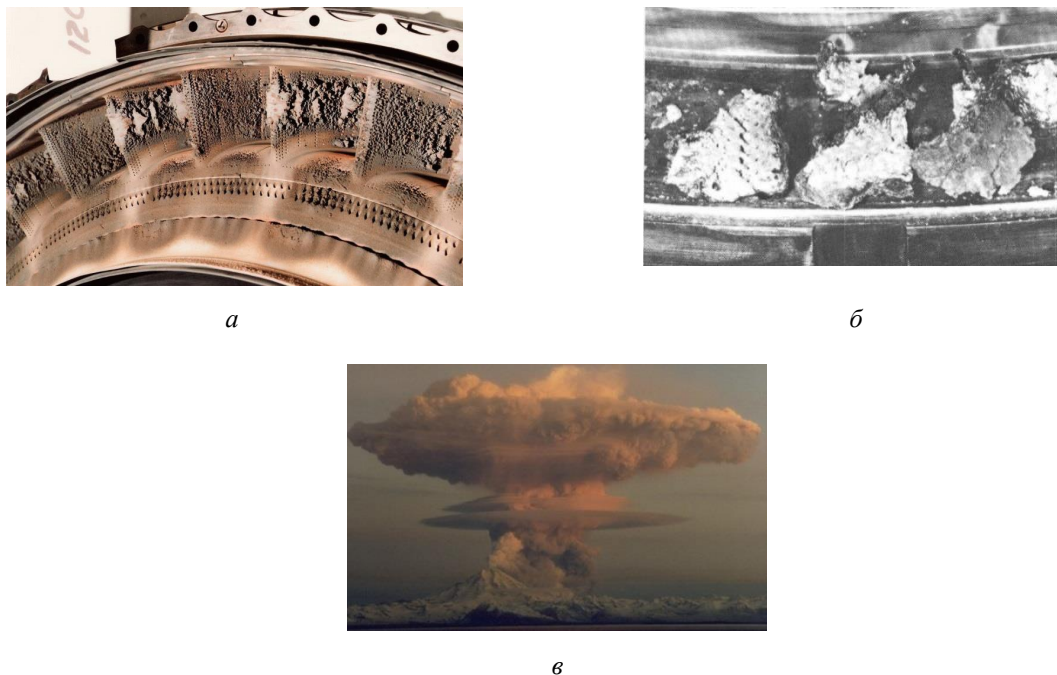


Рис. 10. Воздействие вулканического пепла на сопловой аппарат первой ступени турбины различных ГТД: *а* – двигатель RB211-524D4, вулкан Галунггунг, Индонезия, 1982 г. [3, с. 14];
б – двигатель CF6-80C2, вулкан Редаут, Анкоридж, США, 1989 г. [15, с. 131];
в – облако пепла при извержении вулкана Редаут в 1989 г.

При испытаниях, проводимых корпорацией Calspan, форма и характер отложений на лопатках сопловых аппаратов турбины высокого давления сопоставимы с аналогичными отложениями двигателя RB211-524D4, попавшего в облако пепла вулкана Галунггунг (рис. 11).

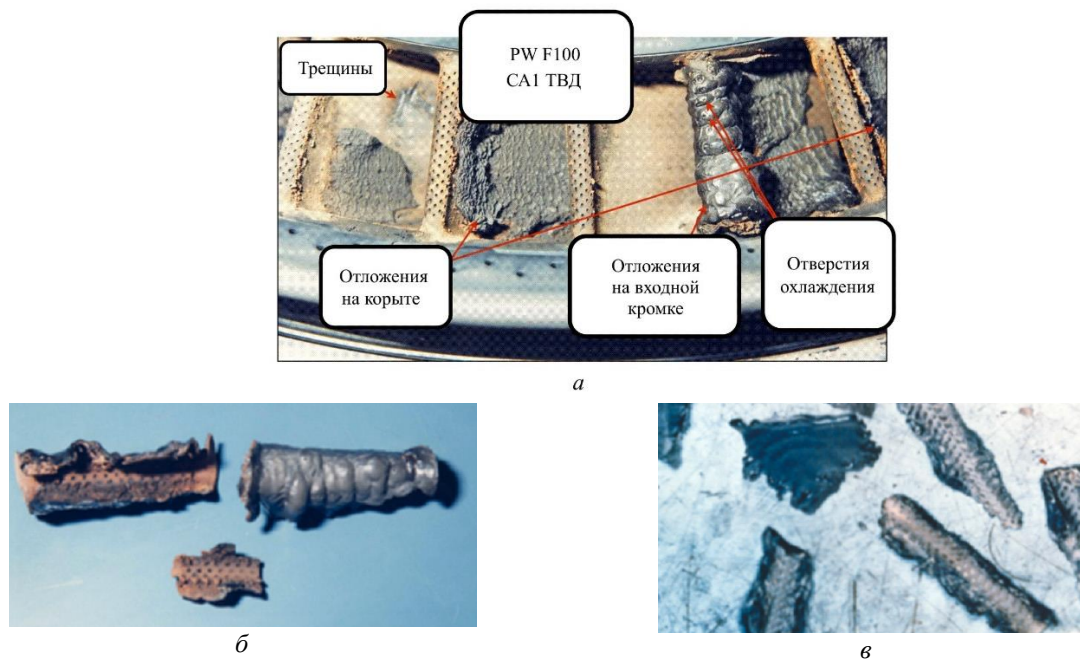


Рис. 11. Отложения на первых сопловых лопатках: *а* – двигателя PWF100 при испытаниях Calspan в результате воздействия 59,46 кг вулканического пепла на авиационный двигатель в течение 84,92 минут; *б* – снятые с лопаток двигателя PWF100 при испытаниях Calspan; *в* – снятые с лопаток двигателя JT-9D, попавшего в облако вулкана Галунггунг, Индонезия, 1982 г. [13]

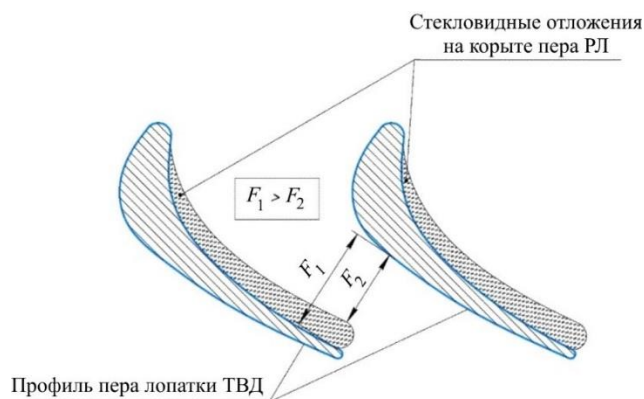


Рис. 12. Изменение площади проходного сечения при аккумуляции отложений на поверхностях лопаток турбины (РЛ – рабочая лопатка, ТВД – турбина высокого давления)

В работе Зигмунда Пржедпельски и Томаса Касадейвала о воздействии вулканического пепла вулкана Редут на двигатели Pratt&Whitney TF33 [14] было показано, что снижение площади проходного сечения на 7–12 % при аккумуляции отложений приводило к потере тяги двигателя и помпам. Экспертные оценки специалистов АО «ОДК-Авиадвигатель» показывают, что такое уменьшение площади приводит к уменьшению запаса газодинамической устойчивости современных двигателей на 5–11 %. Возможно, испытанный образец двигателя имел пониженные запасы газодинамической устойчивости.

Инженерные испытания VIPR (NASA и др.) по забросу вулканического пепла в двигатель PW2040. Сертификационные испытания ПД-14

Рассмотренные выше случаи из эксплуатации и проведенные инженерные испытания не давали возможности проанализировать, при каких условиях двигатели потеряют летную годность, и специалистами США, Англии был поставлен вопрос о накоплении опыта испытаний двигателей с целью анализа воздействия вулканического пепла при различном времени работы двигателя и концентрации вулканического пепла в воздухе и нахождения границы сохранения работоспособности двигателя при попадании вулканического пепла в его тракт.

В связи с этим в рамках проекта исследований силовых установок летательных аппаратов VIPR (Vehicle Integrated Propulsion Research) было проведено испытание на попадание вулканического пепла. Установка для этих испытаний показана на рис. 13 [15, 3].



Рис. 13. Установка для испытаний по забросу вулканического пепла в двигатель PW2040 на крыле самолета [3]

На рис. 14 представлены результаты испытаний двигателя F-117 (гражданская версия PW2040) в рамках программы VIPR по оценке воздействия на двигатель вулканического пепла в зависимости от времени работы двигателя и концентрации пепла. Можно сделать вывод, что повышенные концентрации (более 10 мг/м^3) вулканического пепла в рабочем теле или продолжительное воздействие небольших концентраций ($\sim 1 \text{ мг/м}^3$, 427 мин) приводят к существенным изменениям: засорениям системы охлаждения и перекрытиям проходной площади межлопаточного канала турбины (см. рис. 14), а также отложениям на корпусах камеры сгорания (рис. 15) [4].

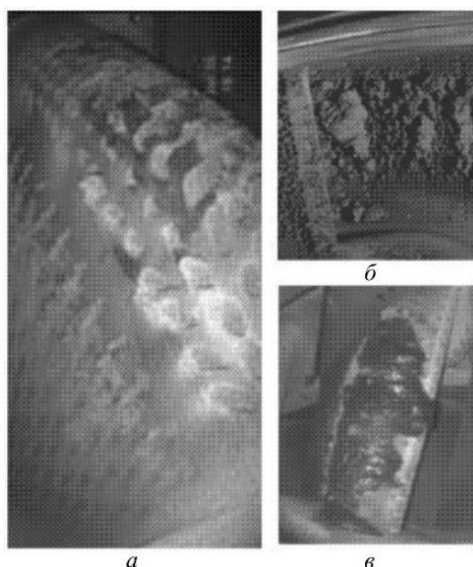


Рис. 14. Отложения вулканического пепла на сопловых лопатках первой ступени турбины:
a – 427 мин при концентрации $\sim 1 \text{ мг/м}^3$; *б* – 3–6 мин при концентрации 100–2000 мг/м^3 ;
в – 175 мин при концентрации 10 мг/м^3 [3]

На корпусах камеры сгорания двигателя F-117 обнаружены как углеродные отложения при работе в течении 3–6 мин при концентрации 100–2000 мг/м^3 , так и стекловидные отложения при 175 мин работы и концентрации 10 мг/м^3 (см. рис. 15).

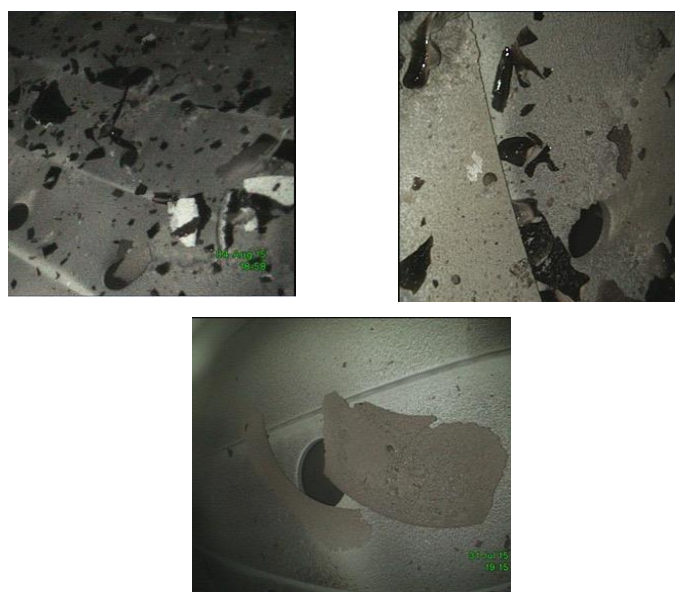


Рис. 15. Отложения на элементах камеры сгорания после заброса вулканического пепла в рамках программы VIPR [3]

На рис. 16 представлена диаграмма, составленная в рамках исследований VIPR путем анализа двигателей, подвергшихся воздействию пепла как в условиях испытаний, так и в условиях реального полета. Диаграмма описывает область работы самолета, при которой двигатель не теряет своей летной годности в зависимости от времени работы и концентрации частиц в облаке вулканического пепла, на диаграмме нанесена граница допустимой дозы пепла, поглощённого двигателем.

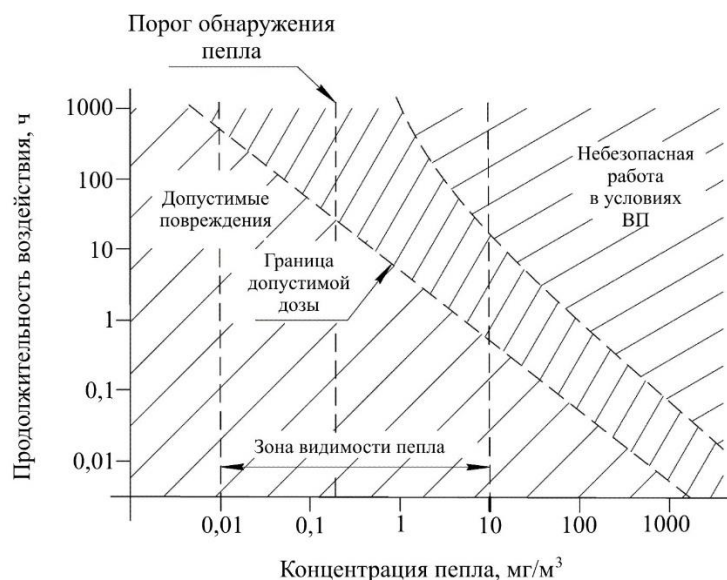


Рис. 16. Область работы двигателя в условиях полета в облаке вулканического пепла в зависимости от продолжительности работы двигателя в облаке пепла и концентрации пепла [3]

В 2015 г. агентство по авиационной безопасности EASA выдвинуло сертификационные требования на устойчивость авиационного двигателя к воздействию вулканического пепла. Первым в мире двигателем, проходящим сертификацию по европейским нормам, включающим испытания по забросу вулканического пепла, является двигатель ПД-14.

Стекловидные отложения, подобные описанным выше, были обнаружены при прохождении сертификационных испытаний двигателя ПД-14 при дозированной подаче пепла с концентрацией 4 мг/м^3 в течение 60 мин. Стекловидные отложения выявили на всех сопловых лопатках первой ступени турбины; отложений на второй рабочей лопатке турбины и далее по потоку не выявлено. Значительно большее количество отложений по сравнению с другими лопатками турбины высокого давления выявлено на первой сопловой (рис. 17): отмечены вытянутые стекловидные образования, получившиеся в результате растекания капель в направлении движения потока воздуха [16]. Данные сертификационных испытаний ПД-14 соответствуют диаграмме, представленной на рис. 16.



Рис. 17. Стекловидные отложения на корыте сопловой лопатки первой ступени турбины ПД-14, соответствующие воздействию пепла в течение 60 мин при концентрации 4 мг/м^3

На дефлекторах и теплозащитных панелях жаровой трубы камеры сгорания ПД-14 после заброса вулканического пепла также наблюдались 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 [16]. Состояние внутренней и внешней поверхностей жаровой трубы представлено на рис. 18.



Рис. 18. *а* – состояние внутренней поверхности жаровой трубы ПД-14;
б – состояние внешней поверхности жаровой трубы ПД-14 [16]

Отложения на поверхностях элементов газогенератора ПД-14 соответствуют составу пепла, используемого при испытаниях ПД-14. Первичный анализ данных химического состава отложений показывает, что по среднему составу отложения соответствуют вулканической породе – андезиту. Углеродных отложений отмечено не было. 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 $\text{Fe}_2[\text{SiO}_4]$).

Выводы

На основании материалов ИКАО, результатов фундаментальных исследований М. Гуффанти, К. Кристманн, собственных поисков представлена общемировая статистика попаданий летательных аппаратов в облака вулканического пепла с 1935 г. по 2021 г.

Всего за данный период установлено 156 инцидентов столкновения с пеплом. В 101 случае имели место повреждения двигателей и/или планера, в том числе десяти подобных полетах было зарегистрировано 26 выключений двигателей. Практически все случаи с выключением двигателей произошли с дальнемагистральными самолетами типа Boeing 747, DC-10.

Выявлено, что, несмотря на глобальный рост мировых авиаперевозок и сохранение вулканической активности на прежнем уровне, количество опасных контактов самолетов с вулканическим пеплом, приводящих к выключениям двигателей в полете, за последние 16 лет уменьшилось до нуля (с 2006 г. не было зарегистрировано ни одного полета с выключением двигателя). Такая тенденция, наиболее вероятно, связана с введением мониторинга вулканической активности силами IAVW, неукоснительным выполнением рекомендованных ИКАО мер по уменьшению воздействия вулканического пепла на летательный аппарат, закрытием воздушного пространства во время извержений и др.

Рассмотрены механизмы и последствия воздействия пепла на детали и сборочные единицы авиационного газотурбинного двигателя. Выявлено, что основными повреждениями газотурбинного двигателя является абразивно-эрозионный износ лопаток компрессора; формирование и

аккумуляция отложений оплавленных частиц пепла на элементах камеры сгорания и лопатках турбины высокого давления; засорение каналов системы охлаждения турбины, формирование углеродных отложений (нагара) на форсунках камеры сгорания, которые могут значительно ухудшить качество распыла топлива и др.

Наиболее критичным последствием воздействия вулканического пепла на авиационный газотурбинный двигатель является формирование и аккумуляция стекловидных отложений на лопатках соплового аппарата первой ступени турбины. Стекловидные отложения приводят к снижению проходной площади соплового аппарата первой ступени на 7–12 % и более.

Библиографический список

1. Руководство по облакам вулканического пепла, радиоактивных материалов и токсических химических веществ // INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. – 3-е изд. – 2015. – 210 с.
2. Чехов И.А. Особенности выполнения полетов в районах с вулканической деятельностью // Наука и образование: проблемы, идеи, инновации. – 2019. – № 4 (16). – С. 80–84.
3. Clarkson R.J., Majewicz E.J., Mack P. A re-evaluation of the 2010 quantitative understanding of the effects volcanic ash has on gas turbine engines // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering. – 2016. – № 230(12). – P. 2274–2291. DOI: 10.1177/0954410015623372.
4. Deposition of volcanic materials in the hot sections of two gas turbine engines / Kim J, Dunn MG, Baran AJ, et al. // ASME Journal of Eng Gas Turbine Power, 1993. – Vol. 115. – P. 641–651.
5. Characterisation of Dirt, Dust and Volcanic Ash: A Study on the Potential for Gas Turbine Engine Degradation / Ch. A. Wood, S. L. Slater, M. Zonneveldt, J. Thornton, N. Armstrong and R. A. Antoniou. – Defense Science and Technology Group, Australia, May 2017. – 66 p.
6. Observing the Volcano World Volcano Crisis Communication: Volcano Crisis Communication / Fearnley C., Bird D., Haynes K., Mcguire B., Jolly G. – Springer; Softcover reprint of the original 1st ed. 2018. – 786 p.
7. Flying into Volcanic Ash Clouds: An Evaluation of Hazard Potential / Christmann C., Nunes R., Schmitt Ang., Guffanti M. – PUBLIC RELEASE. – 2017. – 18 p. – DOI: 10.14339/STO-MP-AVT-272.
8. Guffanti M., Casadevall T.J., Budding K. Encounters of aircraft with volcanic ash clouds: a compilation of known incidents, 1953–2009: U.S. Geological Survey. – Reston, Virginia, 2010. – 16 p.
9. Vehicle Integrated Propulsion Research (VIPR) III Volcanic Ash Ingestion Testing / John D.L., Mark R.W., Clinton W. St. J., Michael W. V., Larry M. – National Aeronautics and Space Administration, May 15–17, 2017. – 64 p.
10. 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. [Электронный ресурс]. – URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=10082046> (дата обращения: 01.10.2022).
11. Камчатская группа реагирования на вулканические извержения (KVERT). [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/> (дата обращения: 01.10.2022).
12. Dunn M. Operation of Gas Turbine Engines in an Environment Contaminated with Volcanic Ash // Journal of Turbomachinery. – 2012. – Vol. 134. – Art. No. 051001. DOI: 10.1115/1.4006236
13. Davison C. R., Rutke T. Assessment and Characterisation of Volcanic Ash Threat to Gas Turbine Engine Performance // National Research Council Canada. – Ottawa, Canada, August, 2014. – Vol. 136. – 10 p.
14. Przedpelski Z., Casadevall Th. Impact of Volcanic Ash from 15 December 1989 Redoubt Volcano Eruption on GE CF6-80C2 Turbofan Engines // U.S. Geol. Survey Bull. – 1994. – Vol. 2047. – P. 129–135.
15. Исследование устойчивости авиационного двигателя ПД-14 к воздействию вулканического пепла / Иноземцев А.А. и др. // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2022. – Т. 26, №2 (96). – С. 60–70.
16. Газогенератор двигателя ПД-14 успешно прошел испытания вулканическим пеплом / Павлецов И.С. и др. // Информационно-технический бюллетень Пермские авиационные двигатели. – 2021. – № 48. – С. 30–33.

References

1. Manual on Volcanic Ash, Radioactive Material and Toxic Chemical Clouds // International Civil Aviation Organization, Third edition, 2015, 210 p.

2. Chekhov I.A. Osobennosti vypolneniya poletov v rayonakh s vulkanicheskoy deyatelnostyu [Features of flights in areas with volcanic activity]. International scientific and practical conference “*Nauka iobrazovanie: problemy, idei, innovacii*”, 2019, pp. 80-84.
3. Clarkson R. Volcanic Ash Impacts on Jet Engines and Developments since 2010. Rolls-Royce (Aero Engines), 29th January 2019, 23 p.
4. Kim J, Dunn MG, Baran AJ, et al. Deposition of volcanic materials in the hot sections of two gas turbine engines // ASME Journal of Eng Gas Turbine Power, 1993, Vol. 115, pp. 641-651.
5. Christopher A. Wood, Sonya L Slater, Matthew Zonneveldt, John Thornton, Nicholas Armstrong and Ross A. Antoniou. Characterisation of Dirt, Dust and Volcanic Ash: A Study on the Potential for Gas Turbine Engine Degradation. Defense Science and Technology Group, Australia, May 2017, 66p.
6. Fearnley, Carina & Bird, Deanne & Haynes, Katharine &Mcguire, Bill & Jolly, Gill. (2018). Observing the Volcano World: Volcano Crisis Communication: Volcano Crisis Communication. Springer; Softcover reprint of the original 1st ed. 2018, 786 p.
7. Christmann C., Nunes R., Schmitt Ang., Guffanti M. Flying into Volcanic Ash Clouds: An Evaluation of Hazard Potential. PUBLIC RELEASE, 2017, 18 p. DOI: 10.14339/STO-MP-AVT-272.
8. Guffanti M., Casadevall, T.J., Budding K. Encounters of aircraft with volcanic ash clouds: a compilation of known incidents, 1953-2009: U.S. Geological Survey, Reston, Virginia: 2010, 16 p.
9. John D. L., Mark R. W., Clinton W. St. J., Michael W. V., Larry M. Vehicle Integrated Propulsion Research (VIPR) III Volcanic Ash Ingestion Testing. National Aeronautics and Space Administration, May 15-17, 2017, 64 p.
10. Girina, O. A., Gordeyev, Ye. I. Projekt KVERT – snizheniye vulkanicheskoy opasnosti dlya aviatsii pri eksplozivnykh izverzheniyakh vulkanov Kamchatki i Severnykh Kuril [The KVERT project – reducing the volcanic hazard for aviation during explosive eruptions of the volcanoes of Kamchatka and the Northern Kuriles]. Vestnik of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, 2007, no. 2, pp. 100-109. URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=10082046> (Accessed: 01.10.2022).
11. Kamchatskaya gruppa reagirovaniya na vulkanicheskiye izverzheniya (KVERT) [Kamchatka Volcanic Eruption Response Team (KVERT)]. URL: <http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/> (Accessed: 01.10.2022).
12. Dunn, M. Operation of Gas Turbine Engines in an Environment Contaminated With Volcanic Ash. Journal of Turbomachinery, 2012, Vol. 134, Art. No. 051001. DOI: 10.1115/1.4006236
13. Davison C. R., Rutke T. Assessment and Characterisation of Volcanic Ash Threat to Gas Turbine Engine Performance // National Research Council Canada, Ottawa, Canada, August, 2014, Vol. 136, 10 p
14. Przedpelski Z., Casadevall Th. Impact of Volcanic Ash from 15 December 1989 Redoubt Volcano Eruption on GE CF6-80C2 Turbofan Engines // U.S. Geol. Survey Bull, 1994, Vol. 2047, pp. 129–135.
15. Inozemcev A.A., Popova D.D. Issledovaniye ustoychivosti aviatsionnogo dvigatelya PD-14 k vozdeystviyu vulkanicheskogo pepla [Study of the stability of the aircraft engine PD-14 to the effects of volcanic ash]. VESTNIK USATU, vol. 26, no. 2(96), 2022, pp. 60-70.
16. Pavletsov I.S. and others. Gazogenerator dvigatelya PD-14 uspeshno proshel ispytaniya vulkanicheskim peplum [The gas generator of the PD-14 engine has successfully passed tests with volcanic ash]. *Informatsionno-tekhnicheskiiy byulleten "Permskiye aviatsionnoyye dvigateli"*, 2021, no. 48, pp. 30-33.

Об авторах

Попова Диана Дмитриевна (Пермь, Россия) – аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, 614013, ул. Профессора Поздеева, 13); инженер отделения турбин, ОДК-Авиадвигатель (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 93, e-mail: popova-dd@avid.ru).

Саженков Алексей Николаевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, помощник управляющего директора – генерального конструктора, ОДК-Авиадвигатель (Пермь, 614990, Комсомольский пр., 93, e-mail: office@avid.ru).

About the authors

Diana D. Popova (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Perm National Research Polytechnic University (13, Professor Pozdееv str., 614013, Perm), Engineer of the Turbine Department, UEC-Aviadvigatel (93, Komsomolskiy av., 614990, Perm, e-mail: popova-dd@avid.ru).

Aleksei N. Sazhenkov (Perm, Russian Federation) – PhD in Technical Sciences, Assistant to Managing Director-General Designer, UEC-Aviadvigatel (93, Komsomolskiy av., 614990, Perm, e-mail: 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: 17.10.2022

Одобрена: 21.10.2022

Принята к публикации: 10.11.2022

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: 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. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.70.12

Please cite this article in English as: 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