

А.С. Козлов¹, Ф.И. Мухутдинов², А.Н. Саженов²

¹Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН,
Новосибирск, Россия

²АО «ОДК-Авиадвигатель», Пермь, Россия

ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ДИСПЕРСНЫХ ПРОДУКТОВ ЭМИССИИ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ЭРОЗИОННОГО ИЗНОСА ЕГО ДЕТАЛЕЙ

Изучение передовых методов и средств диагностики авиационных двигателей показывает, что для выявления эрозионного износа деталей турбомашин в последнее время в программах сопровождения двигателей иностранных производителей достаточно широкое распространение получает спектральный элементный анализ аэрозольных продуктов эмиссии.

Для определения элементного состава аэрозолей на выходе газотурбинного двигателя опробованы оптоэмиссионный, масс-спектрометрический подходы в различных реализациях. Наиболее информативными и доступными лабораторными методами признаны рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия и масс-спектрометрия с индукционно связанной плазмой (ICP-MS). Наиболее распространенный метод отбора проб – фильтрация с использованием тефлоновых аналитических мембран. Для выявления и локализации источника поступления элементов (возможного места эрозионного износа деталей ГТД) во всем мире используются технологии искусственного интеллекта.

Установлено, что основные проблемы использования многоэлементного анализа связаны с процедурой пробоотбора, возможным поступлением элементов износа одновременно из нескольких деталей двигателя, имеющих сходный химический состав; а также изменчивостью состава «фоновый» атмосферного аэрозоля, который является неизбежным компонентом атмосферного воздуха, особенно в приземных условиях.

Представлены первые результаты элементного анализа проб аэрозольных частиц эмиссии современного российского авиационного двигателя с применением рентгеновского флуоресцентного метода.

Ключевые слова: авиационный двигатель, эрозионный износ, эмиссия, элементный анализ, спектрометр, рентгеновский флуоресцентный метод.

A.S. Kozlov¹, F.I. Mukhutdinov², A.N. Sazhenkov²

¹Voevodskiy Institute for Chemical Energy and Combustion of Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

²JSC "UEC-Aviadvigatel", Perm, Russia Federation

ELEMENTAL ANALYSIS OF DISPERSED EMISSION PRODUCTS OF AN AIRCRAFT ENGINE FOR DIAGNOSING ITS PARTS EROSIIVE WEAR

The study of advanced diagnostic methods and tools for aircraft engines shows that spectral elemental analysis of aerosol emission products has recently become quite widespread in the engine maintenance programs of foreign manufacturers for detecting the turbomachinery parts erosive wear. To determine the elemental composition of aerosols at the gas turbine engine (GTE) outlet, opto-emission and mass spectrometric approaches have been used in various implementations. X-ray photoelectron spectroscopy and inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) are recognized as the most informative and accessible laboratory methods. The most common sampling method is filtration with Teflon analytical membranes. Artificial intelligence technologies are used worldwide to identify and localize the source of the elements flow (a potential area of the GTE parts erosive wear).

It has been found that the main problems of applying a multi-element analysis are associated with the sampling procedure, with the potential simultaneous element flow from several engine parts having a similar chemical composition; as well as with the variability of the "background" atmospheric aerosol composition, which is an unavoidable component of atmospheric air, especially in ground-level conditions.

The article also presents the first results of the elemental analysis of aerosol particle emission samples from a modern Russian aircraft engine using the X-ray fluorescence method.

Keywords: aircraft engine, erosive wear, emission, elemental analysis, spectrometer, X-ray fluorescent method.

Введение

Стратегическим направлением развития методов и средств диагностики авиационных двигателей является разработка новых инновационных технологий и объектов контроля на новых физических принципах. Отражением данной тенденции может явиться успешная реализация элементного спектрального анализа аэрозольных продуктов эмиссии авиационных двигателей для выявления эрозионного износа деталей проточной части турбомашин.

В настоящей статье представлен обзор литературы по идентификации эрозионного износа авиационных двигателей на основе анализа аэрозольных продуктов. Подробно представлены результаты зарубежных исследований, затрагивающих физико-химические свойства аэрозольных продуктов эмиссии и их элементный состав. Рассмотрены различные инструментальные подходы применительно к контролю эмиссии двигателя и воздушного судна.

В работе также представлены первые результаты элементного анализа продуктов эмиссии современного российского авиационного двигателя с помощью рентгеновского флуоресцентного метода.

Мировой опыт мониторинга дисперсных продуктов эмиссии авиационной техники

1. Отдел глобального мониторинга Национального управления по исследованию океанов и атмосферы США.

Одна из самых масштабных кампаний по исследованию свойств продуктов эмиссии авиационной техники проводилась в США в начале 90-х гг., преимущественно силами Национального управления по исследованию океанов и атмосферы. Работы имели преимущественно экологическую направленность и последовательно проводились в крупнейших международных аэропортах страны: в 1992 г. был обследован Лос-Анджелес, в 1995 г. – Сизтл, в 97-м – Бостон, в 99-м – Чикаго, в 2004 – Голливуд [1]. В модифицированном виде и с упором на медицинский аспект исследования продолжают по сей день.

Порядок проведения работ был следующий: продукты эмиссии от авиационного двигателя специально не отбирались, но все аэропорты и прилегающая к ним территория

обкладывались планшетами, на которые происходило оседание частиц (рис. 1). Затем планшеты исследовались с помощью сканирующего электронного микроскопа с элементным анализатором.

Установлено, что первичные частицы эмиссии формируют фракцию диаметром 30–50 нм, однако в заметном количестве встречались и цельные частицы диаметром более 1 мкм. На рис. 2 представлены результаты исследования элементного анализа аэрозольных продуктов эмиссии авиационной техники.

По результатам анализа установлено, что помимо углерода и кислорода (суммарно более 95 %) аэрозольные частицы содержат распространенные природные элементы – Na, Ca, Si, Cl. Но также выявлены сера из состава реактивного топлива и конструкционные материалы – магний, алюминий, железо, цинк, медь, содержание которых составило сотые доли процента.

2. Изучение частиц в продуктах эмиссии авиационных двигателей.

Еще одним примером комплексного государственного подхода к анализу продуктов эмиссии авиационной техники является программа APEX (Aircraft Particle Emission eXperiment – эксперимент по изучению частиц в продуктах эмиссии воздушных судов) [2], осуществляемая совместно Аэрокосмическим агентством, Агентством по защите окружающей среды и др. Согласно программе APEX, были обследованы следующие типы ГТД: CFM56-2C1, CFM56-7B24, CFM56-3B1 (CFM International), AE3007A1E, RB211-535E4B (Rolls-Royce).

Исследования проводили в условиях открытого испытательного стенда и на различных эксплуатационных режимах (взлет / посадка). Для отбора проб использовалась шеститочечная гребенка, расположенная вертикально на расстоянии 1–6 м от среза сопла, а также одноточечный пробоотборник, расположенный в выхлопной струе на оси двигателя, но в 30 м позади. Далее посредством трубы длиной 18–25 м проба подавалась на измерительные приборы. Определяли размер и количество аэрозольных частиц, содержание сажи, содержание полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), состав низколетучих органических соединений, морфологию частиц, анион-катионный и элементный состав.



Рис. 1. Планшеты для сбора оседающих частиц эмиссии на крыше административного здания аэропорта

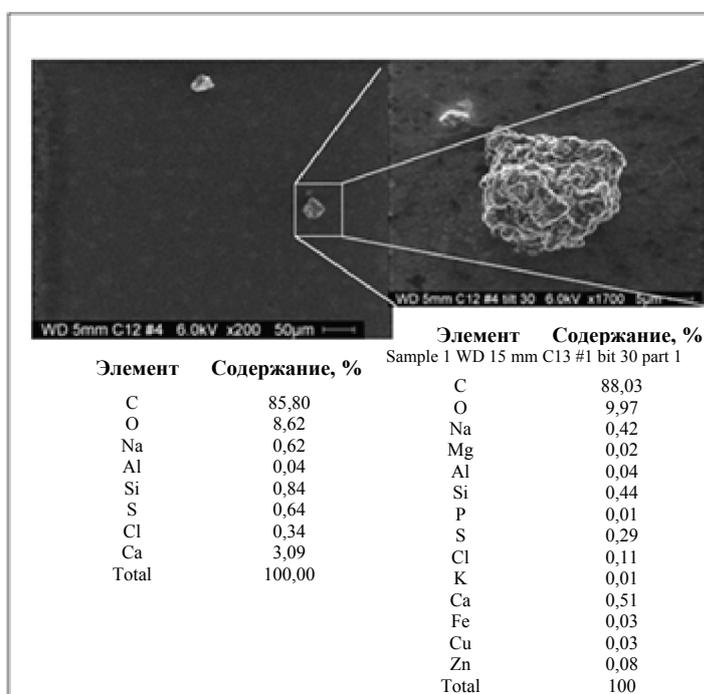


Рис. 2. Результаты элементного анализа аэрозольных продуктов эмиссии

В исследовании элементного состава использовалась рентгеновская флуоресценция частиц на поверхности тефлоновой мембраны, которая впоследствии дополнительно направлялась на лабораторные исследования химического состава. Авторы работы [2] уточняют, что элементный состав частиц может формироваться из состава ГСМ, покрытий и коррозии, загрязнений пробоботборной магистрали и частиц, попадающих в двигатель с воздухом. В исследовании использованы только элементы, разброс концентрации которых не превышал три

аналитических погрешности в аналогичных условиях. Отмечается, что элементный состав существенно отличается для разных типов ГТД и зависит от степени двухконтурности (рис. 3).

Доминирующим элементом в продуктах эмиссии определена сера (54–89 %), отмечается высокий вклад элементов земной коры (кремний, кальций и пр.). Однако установлено присутствие и достаточно редких в природе элементов: хром (компрессор), индий (уплотнения), марганец, сурьма, никель, серебро (конструкционные материалы). – *Прим. автора*).

Металлическим включениям Аэрокосмическое агентство в рамках этой же программы посвятило отдельный отчет [3], где вопрос диагностики ГТД поднимается прямо. На этот раз исследованию подвергались аэрозольные продукты эмиссии воздушных судов Boeing 737, Bombardier Lear, Embraer ERJ, Airbus A300. Определяли гибридизацию и характер связей атомов углерода, наличие полярных функциональных групп (карбонильная, карбоксильная, фенольная), легкие элементы (сера, кислород,

азот) и отдельно – металлы в качестве трассера авиационных выбросов как таковых и диагностического материала для определения производительности ГТД и состояния покрытий.

В работе утверждается, что более тяжелые металлы могут попадать из конструкционных материалов ГТД (рис. 4). Алюминий используется во входном устройстве. Окись алюминия Al_2O_3 – в качестве покрытия для окиси иттрия Y_2O_3 , стабилизированной окисью циркония ZrO_2 .

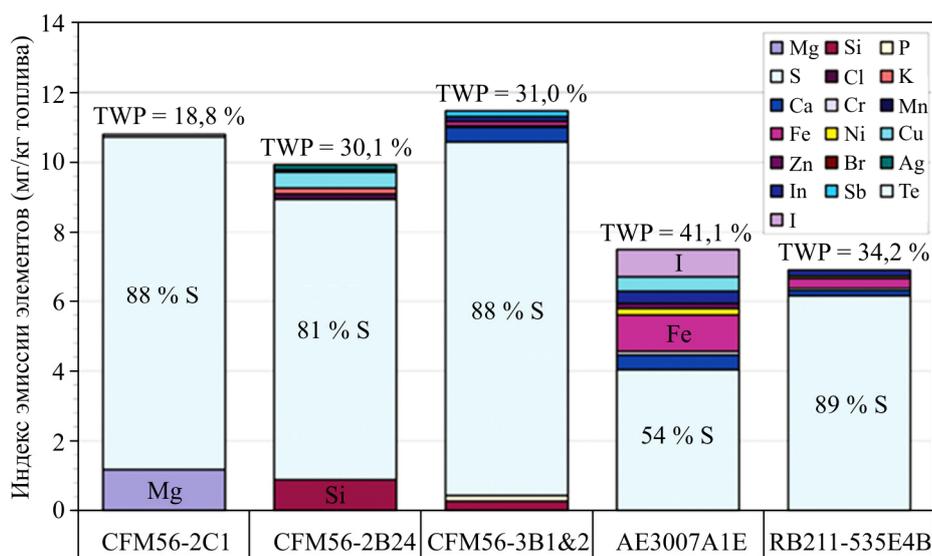


Рис. 3. Индексы эмиссии химических элементов в составе аэрозолей на выходе двигателей. Степень двухконтурности (TWP) приведена в процентах

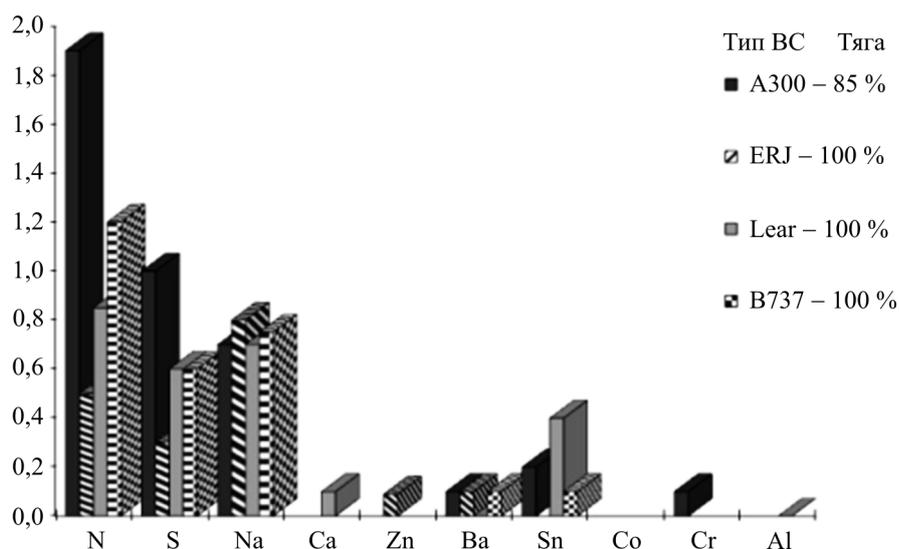


Рис. 4. Относительное содержание химических элементов в составе продуктов эмиссии воздушных судов (ВС) различных производителей. В процентах напротив названия конкретной модели ВС приведен уровень тяги, на котором получен результат

Стронций и барий добавляются в керамическое покрытие для стабильности, в то время как никель и кобальт используются в качестве промежуточного связующего покрытия в составе лопаток турбины. Присутствие любого из этих элементов может служить индикатором эрозии покрытий или находящихся под ними сплавов. Авторы утверждают, что обнаружение элементов в составе частиц эмиссии при помощи рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии может быть использовано в качестве инструмента для определения технического состояния двигателя.

Необходимо отметить, что металлы встречаются и в составе добавок к лубрикантам (маслам), например молибден, который также встречается и в составе истираемых покрытий. Барий добавляется для противостояния коррозии и ржавчине, а также используется как моющее средство и противодымная добавка в топливе. Дитиофосфат и диалкилдитиофосфат цинка – противоизносные, антиоксидантные и коррозионные ингибиторы. Натрий и барий связывают с моющими средствами, которые нейтрализуют сильные кислоты, образующиеся в процессе сгорания топлива. Феноляты, сульфонаты и фосфонаты щелочных и щелочноземельных элементов, таких как кальций, магний, натрий или барий, используются в качестве моющих средств в смазочных материалах.

3. Инструменты контроля дисперсных частиц в авиации.

Один из мировых центров регулирования гражданской авиации расположен в Швейцарии, поэтому неудивительно, что одна из недавних работ [4], посвященных исследованию состава авиационных частиц эмиссии, выполнена Институтом инженерии окружающей среды (Цюрих) под патронажем Федерального офиса гражданской авиации в Берне. Работы проводились в рамках пятой серии международного эксперимента A-PRIDE (Aviation-Particle Regulatory Instrumentation Demonstration Experiment – эксперимент для демонстрации инструментов контроля частиц в авиации).

Исследованию в условиях открытого стенда подвергались три находящихся в производстве высоконагруженных газотурбин-

ных двигателя: первые два – с кольцевой камерой сгорания без смешения потоков наружного и внутреннего контуров и тягой в 120 кН, третий – кольцевой камерой сгорания со смешением потоков, тягой 150 кН. Эксперимент проводился в рамках тестирования нового механизма ИКАО для анализа свойств частиц эмиссии.

Основными инструментами для исследования состава частиц являлись аэрозольный времяпролетный масс-спектрометр, который выдает информацию непрерывно, и масс-спектрометр с индукционно связанной плазмой (ICP-MS), подразумевающий лабораторный анализ частиц, отобранных на фильтровальную мембрану. Вследствие аппаратных ограничений исследовались частицы диаметром, превышающим 100 нм. При помощи специального программного обеспечения масс-спектры частиц группировались по кластерам (группам), в которых наблюдается взаимная корреляция различных компонентов. Всего было выделено семь кластеров частиц, включая соответствующую классификацию для местного атмосферного аэрозоля (рис. 5).

Кластер № 1 характеризуется повышенным содержанием и корреляцией калия, азота и натрия (K–N–Na), № 2 – серы, железа и калия (S–Fe–K), № 3 – калия, азота и углерода (K–N–C), № 4 – азота и железа (N–Fe), № 5 – кальция, азота и натрия (Ca–N–Na), № 6 – углерода, кальция, калия и серы (C–Ca–K–S), № 7 – калия, цианида и азота (K–CN–N). В составе атмосферного аэрозоля присутствуют все типы, в составе продуктов эмиссии первого ГТД – первые три, второго и третьего – первые пять.

Отдельный подраздел исследования посвящен происхождению металлов в составе продуктов эмиссии. В пробах частиц эмиссии в составе сажи для всех обследованных ГТД (исключение ГТД 1 – нет циркония) обнаружены: молибден, кальций, натрий, железо, медь, барий, хром, алюминий, кремний, магний, кобальт, марганец, ванадий, никель, свинец, титан и цирконий. Также в небольшом количестве случаев зарегистрированы сурьма, бор и вольфрам. Металлы, число фракций и относительная площадь пиков для всех ГТД приведены в табл. 1.

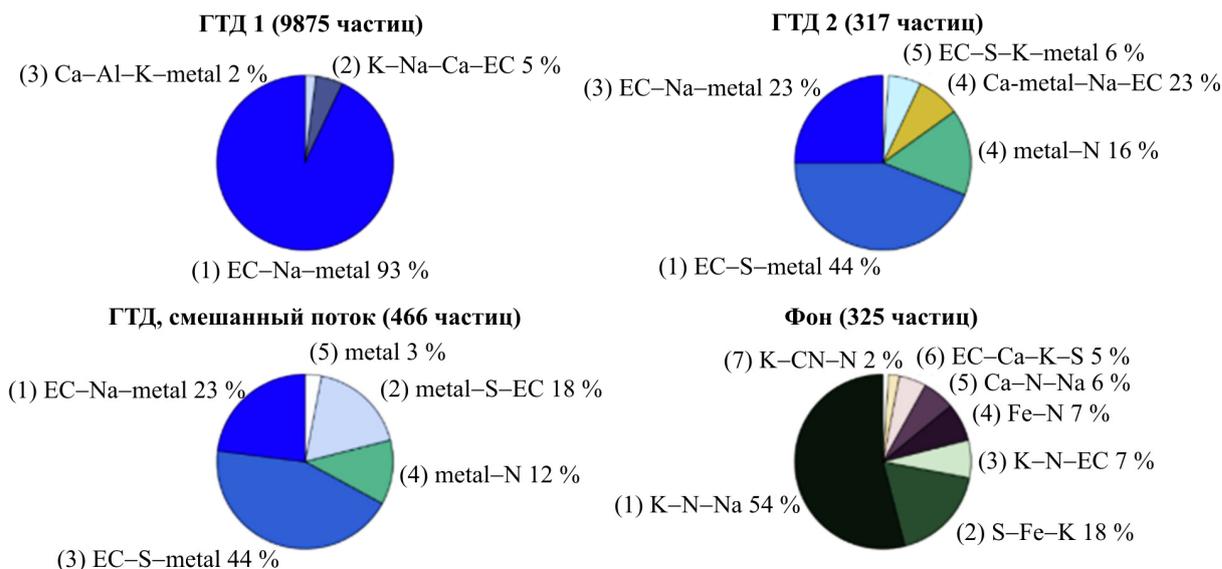


Рис. 5. Основные типы частиц в продуктах эмиссии двигателей и атмосферном аэрозоле. Число в скобках после названия ГТД – полное число проанализированных масс-спектров, число в скобках перед названиями кластеров (разделами диаграмм) – их условный номер

Таблица 1

Процентный вклад в масс-спектр частиц эмиссии ГТД 1, ГТД со смешанным потоком, ГТД 2 и фонового атмосферного аэрозоля

Элемент	ГТД1			ГТД, смешанный поток
	Тяга			
	Низкая	Средняя	Высокая	
Молибден	5,3 (0,52)	5,9 (0,73)	9,6 (1,00)	55,9
Кальций	32,4 (0,61)	16,2 (1,00)	1,8 (0,04)	22,3
Натрий	29,1 (1,00)	22,6 (0,41)	4,3 (0,06)	50,2
Железо	22,5 (1,00)	8,4 (0,49)	0,7 (0,06)	33,0
Медь	2,9 (1,00)	0,4 (0,50)	0,0 (-)	2,6
Барий	0,5 (0,16)	0,3 (1,00)	0,1 (0,08)	3,7
Хром	2,7 (0,10)	17,2 (1,00)	3,6 (0,18)	72,3
Алюминий	3,1 (0,21)	8,4 (1,00)	1,0 (0,03)	8,3
Кремний	0,4 (0,36)	2,1 (1,00)	0,1 (0,15)	0,2
Магний	0,6 (0,46)	1,7 (1,00)	0,3 (0,04)	16,6
Кобальт	0,5 (0,83)	1,4 (1,00)	0,4 (0,93)	1,7
Марганец	0,3 (0,84)	0,9 (1,00)	0,1 (0,02)	17,5
Ванадий	0,4 (0,89)	0,7 (1,00)	0,1 (0,04)	9,4
Никель	0,4 (0,12)	0,6 (1,00)	0,1 (0,04)	10,7
Свинец	0,1 (0,36)	0,4 (1,00)	0,0 (-)	1,3
Титан	0,0 (-)	0,2 (1,00)	0,0 (-)	0,0
Цикорий	0,0 (-)	0,0 (-)	0,0 (-)	0,9

Примечание. Для ГТД 1 значения разбиты по трем уровням тяги: низкий (3–7 %), средний (20–65 %) и высокий (85–120 %). В скобках указана средняя площадь спектрального пика, нормированная на максимальное значение для каждого элемента.

Для ГТД 1 фракция частиц, содержащая молибден, растет с тягой. Для кальция, натрия, железа, меди и бария наблюдается обратная картина. Причиной такого поведения может быть рост общего числа частиц с уве-

личением режима работы. Для хрома, алюминия, кремния, магния, кобальта, ванадия, никеля, свинца и титана соответствующие фракции частиц демонстрируют максимум при средней тяге.

Различия между ГТД в содержании молибдена, бария, хрома, алюминия, магния, марганца, ванадия, никеля и свинца могут объясняться различным потреблением топлива и смазки. Другая причина – разные уровни «истирания» поверхностей на различных этапах эксплуатационного цикла с увеличением к моменту ремонта. Все приведенные вклады металлов минимальны для атмосферного аэрозоля, за исключением распространенных в природе алюминия, кремния и свинца, атмосферное содержание которых может заметно варьироваться.

Для определения источников появления металлов в продуктах эмиссии исследованию элементного состава подвергались: топливо (Jet A-1), смазка (Mobile Jet II) и материал изнашиваемых покрытий двигателя. В качестве образца изнашиваемых покрытий использовались лопатки турбины высокого давления (ТВД). Вклад смазки признан заметно меньшим, чем топлива, вследствие несопоставимого потребления (~5000:1) и в данной работе не рассматривался. Элементный состав топлива и смазки представлен в табл. 2, покрытий ТВД – в табл. 3.

Таблица 2

Концентрация элементов (мг/кг) в топливе и смазке (данные ICP-MS)

Элемент	Топливо (Jet A-1)	Смазка (Mobile Jet II)
Кальций	113,15	30,82
Ванадий	3,59	1,82
Алюминий	3,08	4,35
Свинец	1,98	>0,1
Железо	1,69	1,77
Магний	1,46	2,25
Титан	1,45	6,01
Натрий	1,05	1,28
Медь	0,96	(–)
Сурьма	>0,1	1,15
Хром	(–)	1,09
Другие	4,91	5,3

Примечание. В строке «Другие» приведены суммарно все элементы, концентрация которых не превышала 0,1 мг/кг, включая барий, марганец, олово, никель и молибден.

Таблица 3

Процентный массовый вклад и доверительный интервал (95 %) элементов в составе покрытий ТВД (данные ICP-MS)

№ п/п	Элемент	Массовая фракция
1	Кремний	60,1 [59,6; 60,6]
2	Кальций	12,2 [11,4; 13,0]
3	Натрий	5,03 [4,88; 5,18]
4	Железо	5,00 [4,65; 5,35]
5	Алюминий	4,90 [4,60; 5,20]
6	Магний	4,00 [3,90; 4,10]
7	Никель	3,43 [3,39; 3,47]
8	Хром	0,90 [0,86; 0,94]
9	Титан	0,63 [0,61; 0,65]
10	Марганец	0,39 [0,39; 0,40]
11	Свинец	0,39 [0,37; 0,41]
12	Медь	0,48 [0,45; 0,51]
13	Кобальт	0,32 [0,32; 0,33]
14	Барий	0,20 [0,17; 0,23]
15	Молибден	0,18 [0,17; 0,19]
16	Ванадий	0,051 [0,049; 0,053]
17	Цирконий	0,017 [0,012; 0,022]

Элементный состав ТВД использовался для выявления элементов, вероятно происходящих из покрытий двигателя. Следует отметить, что отчасти он может быть сформирован потоком из камеры сгорания.

Потенциальным источником также могут являться сотовые структуры компрессора. Сотовые структуры являются частью истираемого покрытия из материала Hastelloy X, состав которого, согласно спецификации, следующий: никель – 47 %, хром – 22 %, железо – 18 %, молибден – 9 %, кобальт – 1,5 %, вольфрам – 0,6 %, марганец, кремний – менее 1 %, бор – менее 0,008 %. Предполагается, что Hastelloy X также может давать вклад в состав покрытий ТВД, что объясняется небольшой долей молибдена в последнем.

Подведем итог по преимущественному источнику поступления элементов. Только покрытия: цирконий есть в ТВД, отсутствует в ГСМ; кобальт есть в ТВД и сотовых структурах, отсутствует в ГСМ. В основном покрытие: железо обнаруживается везде, но в составе ГСМ в значительно меньших количествах; медь обнаруживается в керосине, отсутствует в смазке, коррелирует с железом; хром часто используется в составе защитных покрытий, обнаруживается в смазке, отсутствует в топливе; никель в составе ГСМ обнаруживается в минимальных концентрациях; молибден – основной компонент сотовых структур, однако в виде дисульфида зачастую используется в маслах трения металл-металл, где при нагреве превращается в металлический молибден, отсюда и увеличение содержания с ростом тяги.

В основном топливо: барий содержится в ГСМ, в конструкционных материалах ГТД не предусматривается, ранее использовался в качестве добавки к топливу для снижения числа дымности; ванадий есть в ГСМ, в составе ТВД – в незначительных количествах; свинец – в основном в топливе, в незначительных количествах в смазке и ТВД; титан – в составе ГСМ, в незначительных количествах в ТВД, также может использоваться в конструкции КС; кальций и натрий – ГСМ, однако встречается в заметном количестве в составе атмосферного аэрозоля.

Нет однозначного указания на источник: алюминий обнаруживается везде, часто

используется в конструкции ГТД; кремний методически не может быть обнаружен методом масс-спектрометрии с индукционно связанной плазмой, но в небольших количествах используется в конструкции ГТД и установлен в составе атмосферного аэрозоля; магний – потенциальным источником может быть все рассматриваемое в работе; марганец также в небольших количествах везде встречается.

В общем, однозначно установить источник металлов в продуктах эмиссии сложно по следующим причинам: металлы обнаруживаются во множестве компонентов рассматриваемой системы, в условиях реальной эксплуатации все может быть загрязнено компонентами ГСМ, количественно привязать источник в двигателе трудно – расход ГСМ и скорость эрозионного износа поверхностей непостоянны и не всегда известны.

Один из самых недавних аналитических обзоров [5], посвященный диагностике повреждений ГВТ ГТД, ставит проблему эрозии рабочих поверхностей ГТД на второе место среди причин выхода агрегата из эксплуатации. На первом – загрязнение этих же поверхностей, в большинстве случаев устраняемое промывкой водой с детергентами. На третьем – коррозия.

Исследование проб современных авиационных двигателей с помощью рентгено-спектрального метода

Авторами проведены исследования первых образцов продуктов эмиссии современных авиационных двигателей разработки АО «ОДК-Авиадвигатель». Исследованию подвергались продукты эмиссии трех двигателей типовой конструкции, условно обозначенных как ГТД-1, ГТД-2 и ГТД-3, которые отложились на внутренних стенках сопла внутреннего контура двигателя (рис. 6) и были отобраны сразу по завершении очередного этапа стендовых испытаний. Пробы отбирались методом мазка на тефлоновую ленту дымомера AVL-415SE до появления заметного почернения. Данные передавались в Институт химической кинетики СО РАН. Измерения проводились на рабочей станции синхротронного излучения накопителя ВЭПП-3 Института ядерной физики СО РАН. Энергия возбуждения оптической эмиссии атомов со-

ставляла 23 кЭв. Такой подход обеспечил рекордную разрешающую способность выявления металлов на уровне 1 нг/см^2 , что на 2–3 порядка выше ряда западных спектрометров.

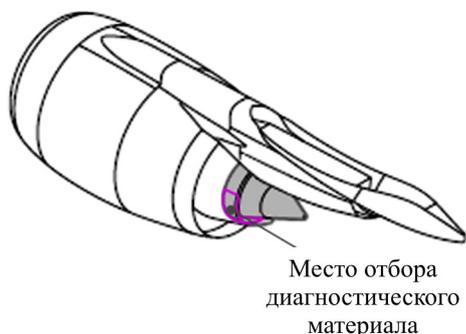


Рис. 6. Место отбора диагностического материала на двигателе

Для иллюстрации характера полученных данных и возможных методов их использования из всего массива данных выделено три этапа (приработка, исходная дроссельная характеристика, завершающая дроссельная характеристика), являющихся общими в программе испытаний всех ГТД. Осредненная по каждому ГТД информация по элементному составу представлена на рис. 7.

Помимо основных конструкционных элементов – железа и никеля, обращает на себя внимание высокое содержание кальция и титана, а также сверхобогатение циркони-

ем, который является штатным элементом покрытий горячей части ГТД.

Материал каждого из трех ГТД демонстрирует свои элементные максимумы: ГТД-1 – титан, железо; ГТД-2 – кальций; ГТД-3 – цирконий. Следует заметить, что относительные вариации элементного состава между рассматриваемыми ГТД существенно превышают вариации внутри испытательного цикла каждого ГТД в отдельности. Таким образом, можно предварительно говорить об элементной паспортизации двигателей.

При совместном рассмотрении с составом материалов ГВТ (рис. 8) наибольшее совпадение наблюдается по хрому, титану, иттрию и цирконию. Наибольшее расхождение – по цинку, свинцу и ниобию (среди элементов, включенных и в результаты измерений, и в ведомость материалов).

Полученные результаты измерений элементного состава продуктов эмиссии современных авиационных двигателей рентгеноспектральным методом свидетельствуют, что такой экспериментальный подход вполне реализуем и содержит потенциал для идентификации механического износа узлов и деталей двигателя. Однако необходимо провести большое количество исследований для успешной интерпретации результатов диагностики.

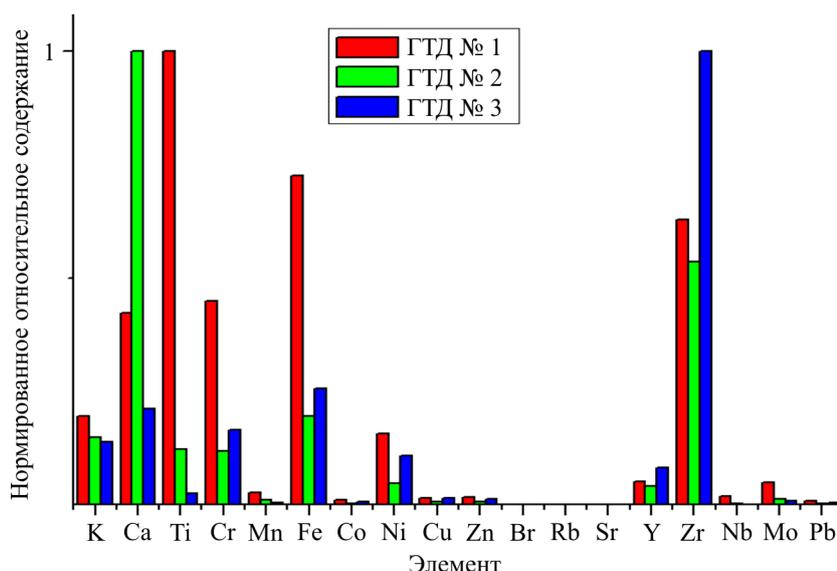


Рис. 7. Средний по трем этапам испытаний нормированный на максимальное содержание элементный состав эмиссии авиационных ГТД

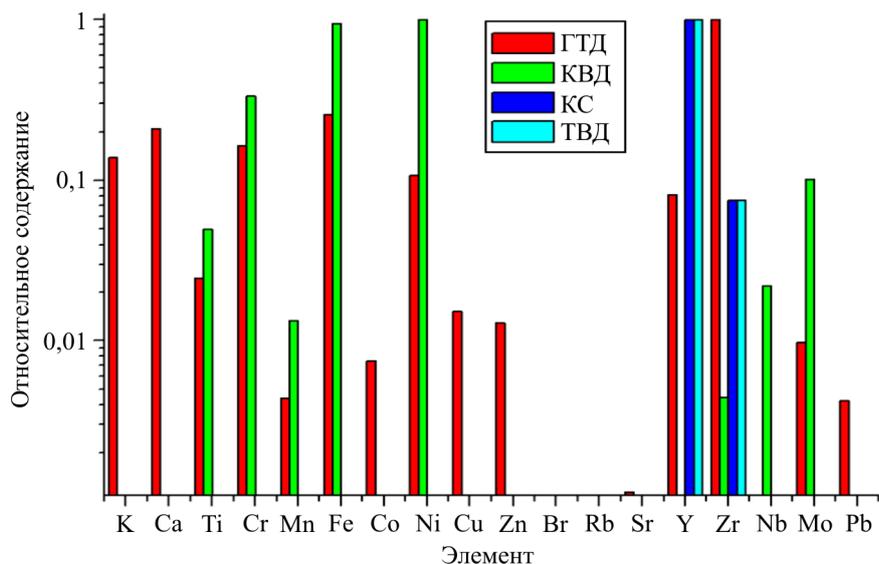


Рис. 8. Сопоставление элементного состава продуктов эмиссии двигателя (ГТД-3) (выделение красным) с выборочными данными материалов, использованных в конструкции

Заключение

Обзор литературы, посвященной исследованию аэрозольных продуктов эмиссии ГТД, показал, что элементный анализ распространен достаточно широко в технологиях и программах США и Европы. Для определения элементного состава опробованы оптоэмиссионный и масс-спектрометрический подходы в различных реализациях. Наиболее информативными и одновременно доступными лабораторными методами признаны рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия и масс-спектрометрия с индукционно связанной плазмой. Наиболее распространенный метод отбора проб – фильтрация с использованием тефлоновых аналитических мембран.

Основные проблемы использования связаны с процедурой пробоотбора, поступлением однотипных элементов одновременно из нескольких узлов ГТД, а также изменчивостью состава атмосферного аэрозоля, который является неизбежным компонентом атмосферного воздуха.

Применение стандартных процедур пробоотбора эмиссии ГТД с помощью трубопроводных коммуникаций затратно и сложно для эксплуатации. Однако, как показывает мировой опыт, пассивные методы получения проб (естественное осаждение частиц) вполне могут обеспечить диагностические потребности и являются предпочтительными.

Впервые проведены уникальные измерения элементного состава продуктов эмиссии современных авиационных двигателей, депонированных на внутренних стенках сопла. Измерения производили с помощью высокочувствительного рентгеновского флуоресцентного метода.

Однако необходимо провести большое количество исследований для успешной интерпретации результатов диагностики и подтверждения эффективности спектральных методов оценки эрозионного износа ГТД в эксплуатации.

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

1. Investigating Air Emission Impacts on the Community: Particle Deposition from Airport Activities. Final report 2006.
2. Chemical characterization of the fine particle emissions from commercial aircraft engines during the aircraft particle emissions eXperiment (APEX) 1 to 3 / J.S. Kinsey, M.D. Hays, Y. Dong, D.C. Williams, R. Logan // Environ. Sci. Technol. – 2011. – Vol. 45. – P. 3415–3421.

3. Vander Wal R.L., Bryg V.M. Chemistry characterization of jet aircraft engine particulate by xps: results from APEX III // Report NASA/CR—2014-218293.
4. Chemical characterization of freshly emitted particulate matter from aircraft exhaust using single particle mass spectrometry / M. Abegglen, B.T. Brem, M. Ellenrieder, L. Durdina, T. Rindlisbacher, J. Wang, U. Lohmann, B. Sierau // *Atmospheric Environment*. – 2016. – Vol. 134. – P. 181–197.
5. A review on gas turbine gas-path diagnostics: state-of-the-art methods, challenges and opportunities / A.D. Fentaye, A.T. Baheta, S.I. Gilani, K.G. Kyprianidis // *Aerospace*. – 2019. – Vol. 6. – P. 83.

References

1. Investigating Air Emission Impacts on the Community: Particle Deposition from Airport Activities. Final report 2006.
2. J.S. Kinsey, M.D. Hays, Y. Dong, D.C. Williams, R. Logan. Chemical Characterization of the Fine Particle Emissions from Commercial Aircraft Engines during the Aircraft Particle Emissions eXperiment (APEX) 1 to 3. *Environ. Sci. Technol.* 2011, vol. 45, pp. 3415-3421.
3. Randy L. Vander Wal, Victoria M. Bryg. Chemistry Characterization of Jet Aircraft Engine Particulate by XPS: Results From APEX III // Report NASA/CR—2014-218293.
4. Manuel Abegglen, B.T. Brem, M. Ellenrieder, L. Durdina, T. Rindlisbacher, J. Wang, U. Lohmann, B. Sierau. Chemical characterization of freshly emitted particulate matter from aircraft exhaust using single particle mass spectrometry. *Atmospheric Environment* 2016, vol. 134, pp. 181-197.
5. Amare D. Fentaye, Aklilu T. Baheta, Syed I. Gilani and Konstantinos G. Kyprianidis. A Review on Gas Turbine Gas-Path Diagnostics: State-of-the-Art Methods, Challenges and Opportunities. *Aerospace* 2019, vol. 6, 83 p.

Об авторах

Козлов Александр Сергеевич (Новосибирск, Россия) – кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН (630090, Новосибирск, ул. Институтская, д. 3, e-mail: kozlov@kinetics.nsc.ru).

Мухутдинов Фарит Ибраевич (Пермь, Россия) – заместитель начальника отдела диагностики АО «ОДК-Авиадвигатель» (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 93, e-mail: muhutdinov@avid.ru).

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

About the authors

Aleksandr S. Kozlov (Novosibirsk, Russian Federation) – Csc of Chemical Sciences, Senior Research, Voevodskiy Institute for Chemical Energy and Combustion of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (3, Institutskaya st., Novosibirsk, 630090, Russian Federation; e-mail: kozlov@kinetics.nsc.ru).

Farit I. Mukhutdinov (Perm, Russian Federation) – Deputy Head of the Diagnostics Department, JSC “UEC-Aviadvigatel” (93, Komsomolskiy av., Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: muhutdinov@avid.ru).

Aleksei N. Sazhenkov (Perm, Russian Federation) – Csc of Technical Sciences, Executive Assistant to Managing Director – General Designer, JSC “UEC-Aviadvigatel” (93, Komsomolskiy av., Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: office@avid.ru).

Получено 12.11.2021

Принято 03.12.2021

Опубликовано 28.01.2022