

DOI: 10.15593/2224-9982/2020.62.03

УДК 629.7.036.34

**А.Н. Саженов¹, А.М. Сипатов¹, В.В. Цатиашвили¹,
Т.В. Абрамчук¹, А.К. Петров², А.С. Козлов², М.В. Панченко³**

¹ОДК-Авиадвигатель, Пермь, Россия

²Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН, Новосибирск, Россия

³Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия

АППАРАТУРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ФРАКЦИОННОГО И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НЕЛЕТУЧИХ ЧАСТИЦ В ПРОДУКТАХ ЭМИССИИ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Бурный рост авиаперевозок способствует увеличению выбросов вредных веществ в атмосферу. В число таких выбросов входят и аэрозольные наночастицы, для которых характерна высокая удельная поверхность, а также в ряде случаев высокая степень неравновесности, приводящая к высокой концентрации радикальных центров на поверхности и, как следствие, к высокой реакционной способности и высокой токсичности. Из-за негативного влияния высокодисперсных аэрозолей, образующихся при эксплуатации авиационных двигателей и наземных энергетических установок, на человеческий организм, качество окружающей среды и климатические изменения вопрос о введении ограничений на уровень выбросов нелетучих твердых частиц становится объектом пристального внимания соответствующих регулирующих организаций.

В апреле 2016 г. состоялось 10-е совещание Комитета по охране окружающей среды от воздействия авиации, на котором были рассмотрены предложения по введению ограничения на эмиссию нелетучих твердых частиц. Эти предложения применяются к двигателям, изготавливаемым с 1 января 2020 г.

Представлены характеристики оборудования и результаты экспериментальных исследований химического и фракционного состава нелетучих частиц в диапазоне размеров 10–1100 нм в продуктах сгорания камеры сгорания авиационного двигателя. Исследования проведены в условиях высокопараметрического автономного стенда с применением специального оборудования для измерения фракционного состава частиц в темпе проведения стендовых испытаний. Исследование химического состава осажденных на фильтре частиц проводилось лабораторными методами.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, эмиссия, нелетучие частицы, камера сгорания, экспериментальное оборудование, измерения.

**A.N. Sazhenkov¹, A.M. Sipatov¹, V.V. Tsatiashvili¹,
T.V. Abramchuk¹, A.K. Petrov², A.S. Kozlov², M.V. Panchenko³**

¹UEC-Aviadvigatel, Perm, Russian Federation

²Institute of Chemical Kinetics and Combustion named after V.V. Voevodsky,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

³Institute of Atmospheric Optics named after V.E. Zuev, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation

DEVICE FOR MEASURING FRACTIONAL AND CHEMICAL COMPOSITION OF NON-VOLATILE PARTICLES IN GTE EMISSION PRODUCTS

Intensive growth of air transport provides increasing in hazardous substances emission in the atmosphere. Among such emissions also are nano-particulates specific with high- surface area and sometimes high non-uniformity resulting in high concentration of radical centers on the surface and therefore in high reactivity and high toxic properties.

Negative influence of high-dispersive aerosols emitted by aviation engines and gas turbine electric power units on human health, environmental quality and climatic changes makes the question about particular matter emission restrictions imposition being an object of careful attention from regulatory organizations.

In April 2016 the tenth meeting of the Committee on Aviation Environmental Protection (CAEP/10) took place where a first of its kind non-volatile Particulate Matter engine emissions standard which will apply to engines, manufactured from 1 January 2020 were proposed.

In the article the experimental equipment characteristics and experimental investigation results of chemical and fractional composition of particular matter in size ranges from 10 to 1100 nm for aviation engine combustion products are presented. Researches were performed at high performance test bench for civil aviation engines combustors tests using dedicated equipment for real-time fractional composition measurements. Compositional analysis of probes collected on filter was performed in laboratory way.

Keywords: gas turbine engine, emission, particular matter, combustor chamber, experimental equipment, measurements.

Введение

Под нелетучими частицами принято понимать ультрадисперсные аэрозоли на основе частиц сажи размером от нескольких нанометров до нескольких микрон, сохраняющиеся при температуре выше 300 °С. Выбросы нелетучих частиц газотурбинными установками на текущий момент определяются безразмерным числом дымности SN (smoke number), установленным в стандарте [1]. Основной недостаток, возникающий при использовании числа дымности, – отсутствие информации о концентрации, массе и размере определяющих его частиц, а также о содержании органических веществ в составе частиц, появлению которых в окружающей среде сопутствует значительный риск. В связи с этим 26 апреля 2016 г. на отчетном собрании Комитета ИКАО¹ по защите окружающей среды рассмотрены предложения по принятию нового стандарта на эмиссию нелетучих твердых частиц авиационными газотурбинными двигателями (ГТД). Нормирование вводится с целью сокращения негативного влияния на качество воздуха в районе аэропортов и климат Земли [1–4]. Принятие ограничительных сделает его соблюдение обязательным для производителей авиационных ГТД.

Иностранцами коллегам уделяется пристальное внимание эмиссии нелетучих частиц, отработке методик определения их содержания в выхлопных газах [5]. На данный момент имеются базы данных по эмиссии нелетучих частиц для большинства современных и планируемых к серийному производству западных двигателей [6–9]. Специализированных баз данных с уровнями эмиссии нелетучих частиц для отечественных двигателей нет, экспериментальные исследования характеристик эмиссии нелетучих частиц в продуктах сгорания авиационных ГТД проводятся лишь в отдельных отечественных организациях [10].

¹ Прил. 16 к Конвенции о международной гражданской авиации «Охрана окружающей среды». Т. II. Эмиссия авиационных двигателей. 2008. 118 с.

Целью исследования являлось создание комплекса оборудования для определения фракционного и химического состава аэрозольных продуктов сгорания (нелетучих частиц) авиационного керосина в воздухе с использованием стандартизованных ИКАО методов отбора, транспортирования и подготовки пробы для газового анализа.

Работа состояла из нескольких этапов:

1. Оценка потерь нелетучих частиц в существующих стендовых линиях подачи проб на газовый анализ.

2. Разработка методики восстановления распределения аэрозольных частиц по размерам в продуктах сгорания по измеренным распределениям аэрозольных частиц в газовой пробе.

3. Определение фракционного и химического состава аэрозольных частиц при испытаниях отсека камеры сгорания на высокопараметрическом стенде.

Техническая часть работ проводилась на стенде АО «Авиадвигатель» для автономных испытаний камер сгорания, позволяющем обеспечивать следующие параметры:

- давление воздуха на входе до 21 кгс/см²;
- расход до 3,6 кг/с;
- температура до 550 °С.

Аппаратура для измерения фракционного и химического состава нелетучих частиц

Для регистрации дисперсного (фракционного) состава нелетучих частиц (аэрозолей) в продуктах эмиссии использовался электростатический классификатор с конденсационным счетчиком частиц SMPS + C производства GRIMM Aerosol Technik & Co KG (Германия), для определения химического состава – газовый хромато-масс-спектрометр Agilent 6890N/5973N (Agilent Technologies, США).

Электростатический классификатор с конденсационным счетчиком частиц SMPS + C (scanning mobility particle sizer + counter) применяется для определения размеров и концентраций

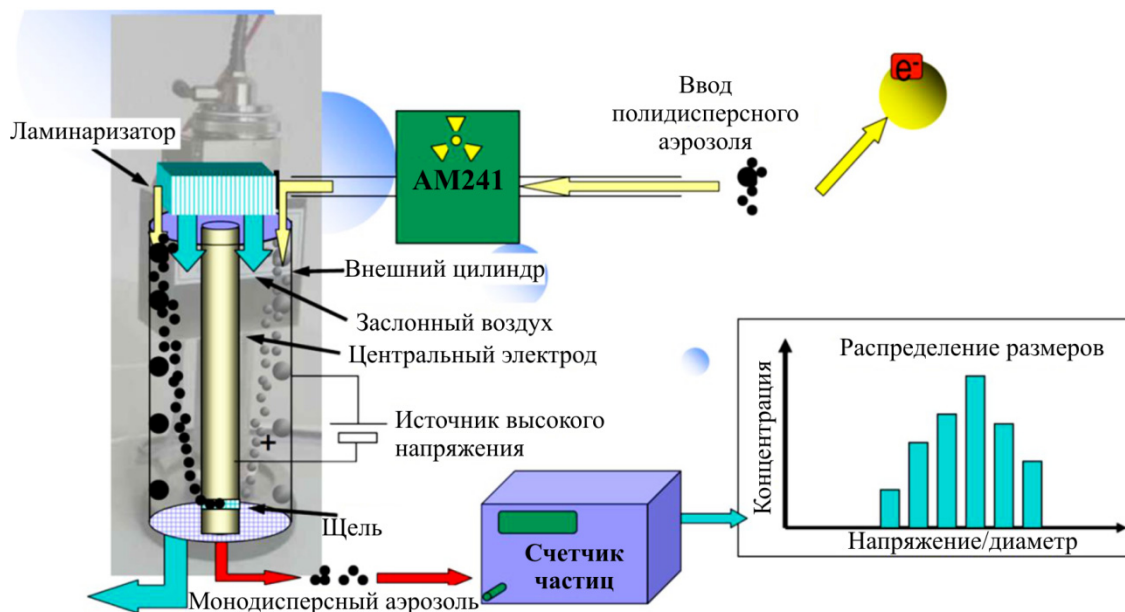


Рис. 1. Принцип работы сканирующего анализатора размеров частиц по подвижности SMPS

субмикронных частиц, в особенности для частиц диаметром менее 100 нм, поскольку интенсивность рассеянного света уменьшается в шестой степени в зависимости от размера частиц и стандартные оптические системы регистрации не могут их обнаружить (рис. 1).

В конденсационном счетчике частиц CPC (condensation particle counter) наночастицы увеличиваются в размерах благодаря конденсации. Воздух пробы проходит через нагретый испаритель, где он обогащается бутанолом. Затем он охлаждается в конденсаторе, где насыщенные пары конденсируются на частицы, которые выступают ядрами конденсации. Полученные капли уже достаточно велики, чтобы быть обнаруженными с помощью оптического рассеяния света. Анализатор SMPS использует принцип DMA (differential mobility analyzer – дифференциальный анализатор подвижности) для определения размеров частиц по их подвижности в электрическом поле. Предварительная биполярная зарядка аэрозольных частиц производится при помощи источника альфа-частиц Am^{241} . Отрицательно заряженные частицы притягиваются положительным электродом при заданном напряжении, и только частицы определенного размера и, соответственно, с определенной подвижностью проходят через выходную щель в положительном электроде DMA, выполненном в виде полого цилиндра. Распределение частиц по размерам по-

лучается за счет изменения напряжения в диапазоне от 5 до 10 000 В.

Добавив дифференциальный анализатор подвижности DMA к конденсационному счетчику CPC, можно получить сканирующий анализатор подвижности частиц (SMPS + C) с высоким разрешением, работающий в диапазоне от 5 до 1100 нм. Система работает от батарей и является портативной. Основные технические характеристики используемой модели 5.403 следующие (рис. 2):

- диапазон измеряемых диаметров частиц 5–1100 нм;
- максимальная концентрация в одном канале $20\,000\text{ см}^{-3}$;
- максимальная общая концентрация 10^7 см^{-3} ;
- порог регистрации конденсационного счетчика $D_{1/2} = 4,5\text{ нм}$;
- объемный расход анализируемого аэрозоля 0,3 л/мин;
- габариты изделия (В×Ш×Г) – $22\times 26\times 30\text{ см}$;
- напряжение питания 220 В, потребляемая мощность 200 Вт.

Для идентификации неизвестных соединений и проведения высокоселективного и высокочувствительного (50 пкг) количественного анализа методом предварительного разделения субстанций при помощи газового хроматографа с последующим анализом спектра масс фраг-

ментов и молекулярного иона соединения использовался газовый хроматограф Agilent 6890N/5973N (рис. 3) с масс-селективным детектором (масс-спектрометром). Для упрощения идентификации веществ используются библиотеки масс-спектров NIST-11 (410 тыс. соединений) со структурными формулами (314 тыс. формул).

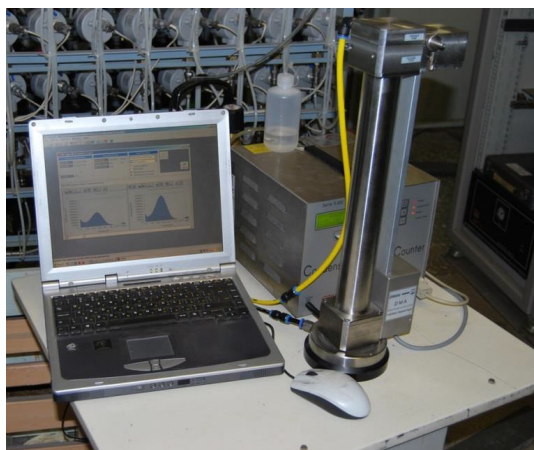


Рис. 2. Внешний вид системы SMPS + C в процессе проведения измерений на стенде



Рис. 3. Внешний вид системы Agilent 6890N/5973N в лаборатории

Количественному анализу подвергались органические соединения в составе нелетучих частиц – линейные насыщенные углеводороды (алканы нормального строения) и их изомеры, полиароматические углеводороды. Полиядерными ароматическими (полиароматическими) углеводородами (ПАУ) называют класс химических соединений, в структуре которых присутствует объединение трех и более

бензольных колец. Основными источниками ПАУ являются процессы неполного сгорания и пиролиза органического материала. ПАУ токсичны, могут обладать канцерогенными свойствами. Благодаря высокому удельному содержанию углерода являются прекурсорами и спутниками сажи.

Отбор газовых проб (50–1000 л) осуществлялся на тефлоновые аналитические мембраны (Grimm 1.113A, поверхность 20 см², диаметр пор 1,2 мкм) с последующей экстракцией хроматографическим ацетоном (ОП-2 ОСЧ 9–5, 1,5 мл) в ультразвуковой бане и вакуумной концентрацией до 10 мкл. Объем хроматографической пробы составлял 2 мкл без разбавления. Термограмма: нагрев 50–250 °С со скоростью 5 °С/мин, изотерма при конечной температуре – 45 мин. В качестве стандартов для количественной идентификации использованы сертифицированные аналитические смеси: n-алканы C₈–C₄₀ (Fluka: Alcane standard solution C₈–C₂₀, Alcane standard solution C₂₁–C₄₀), полиароматические, включая некоторые полихлорированные углеводороды (Supelco: EPA PAH 525 MixB, PAH 525 semivolatile). Проведена калибровка прибора, определены значения времени выхода компонентов, составлены целевые и калибровочные библиотеки для программы идентификации. Идентификация проводилась в автоматическом режиме при помощи программы AMDIS (NIST 11) с учетом времени выхода и совпадения масс-спектра.

Подключение приборов регистрации частиц к существующим линиям подачи проб на химический анализ стандов осуществлялось единообразно по схеме, представленной на рис. 4.

Участок от двухпозиционного крана, перенаправляющего поток газа от газоаналитического оборудования к аэрозольным приборам ИХКГ, сделан съемным и перемещался вместе с оборудованием от станда к станду. На этом участке расположены вентиль с манометром, калориметрический расходомер (VA420, CS Instruments GmbH, ФРГ) и стабилизатор давления (ITV100, SMC, Япония), обеспечивающие комфортную работу комплекса для анализа свойств частиц в полном

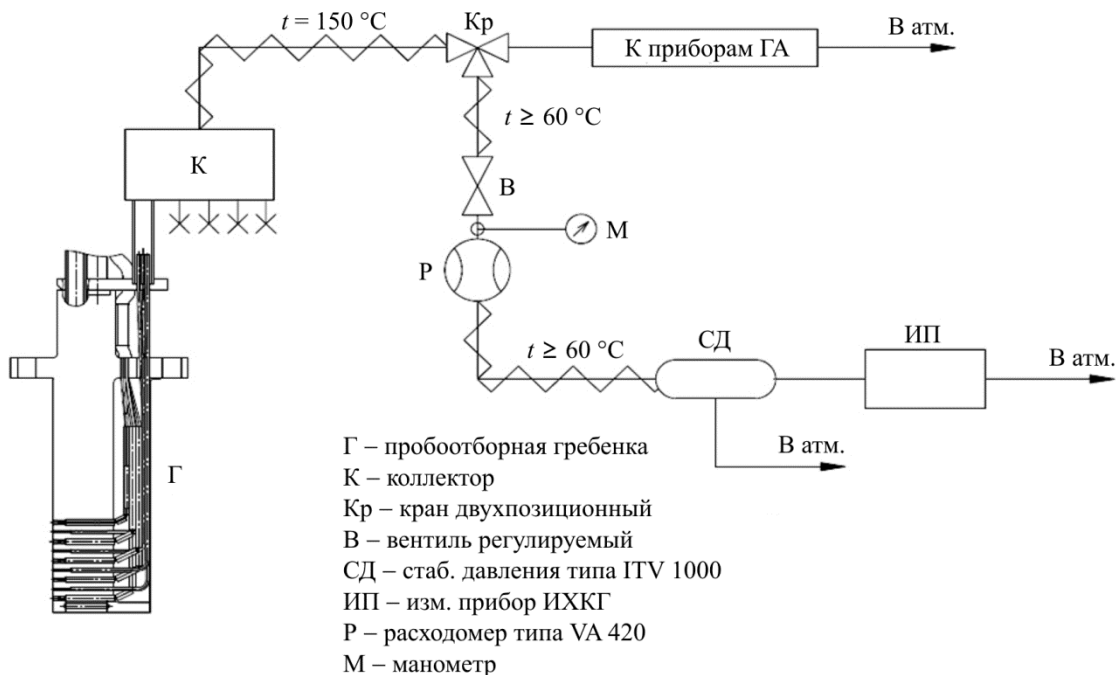


Рис. 4. Схема подключения прибора регистрации частиц к существующим стендовым линиям отбора проб

соответствии с техническим заданием. Дополнительно в ряде случаев, для снижения счетной концентрации частиц, в тракте устанавливался статический капиллярный либо регулируемый динамический коаксиальный разбавитель. В ходе измерений поток не делился между штатным газоаналитическим и передвижным аэрозольным блоками приборов, а полностью перенаправлялся, что несколько удлиняло совокупное время испытаний, но обеспечивало точное измерение величины потока газа в магистрали для учета потерь частиц в линии.

Оценка потерь нелетучих частиц

Для работы представленной аппаратуры фактические концентрации частиц в пробе слишком велики, и общепринятым способом является кратное разбавление пробы чистым газом без примесей. При измерениях западных исследователей общей практикой является вдув горячего (160 °С) азота в пробоотборную линию и использование дополнительного насоса откачки в конце линии для компенсации введенного в пробу разбавителя. На стенде АО «Авиадвигатель» для разбавления пробы предложен оригинальный способ, суть кото-

рого заключается в использовании в качестве разбавляющего газа части исходной пробы, очищенной на тонком фильтре от частиц.

Существующие линии отбора проб на испытательных стендах АО «Авиадвигатель» предназначены для отбора проб газов согласно АП п. 34² и первоначально не предназначались для отбора нелетучих частиц. Штатная магистраль для отбора газовых проб на стенде имеет внутренний диаметр 4 мм и длину 17 м. Длина подогреваемого участка (макс. 160 °С) составляет 8 м. Давление в магистрали в ходе испытаний не превышает 15 атм. Высокодисперсные частицы обладают большим коэффициентом диффузии. Продолжительное пребывание полидисперсной смеси в измерительных трактах ведет к потерям, в первую очередь самых мелких – нанометровых, за счет диффузионного потока на стенки тракта и коагуляции, а также частиц размером 1 мкм за счет гравитационного осаждения (седиментации). Существуют и другие механизмы потерь частиц при движении полидисперсной смеси в каналах [11]. В результате движения по каналам размерное распределение частиц искажается, и требуется его восстановление.

² Авиационные правила. Ч. 34. Эмиссия загрязняющих веществ авиационными двигателями. Нормы и испытания / Межгос. авиац. комитет. М., 2003. 93 с.

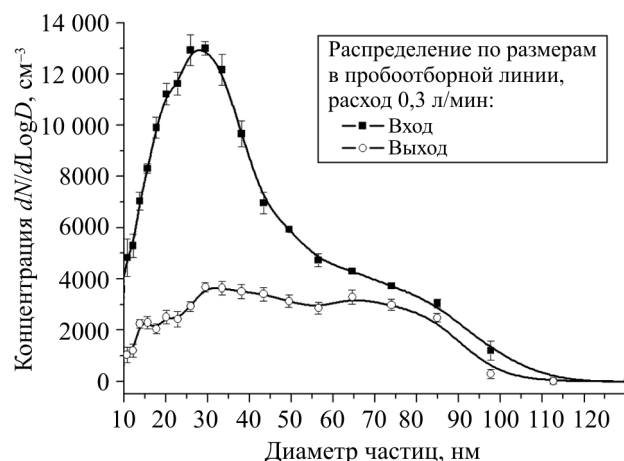


Рис. 5. Распределение концентрации аэрозольных частиц по размерам на входе и на выходе из пробоотборной линии при нормальных условиях без обогрева для объемного расхода воздуха 0,3 л/мин

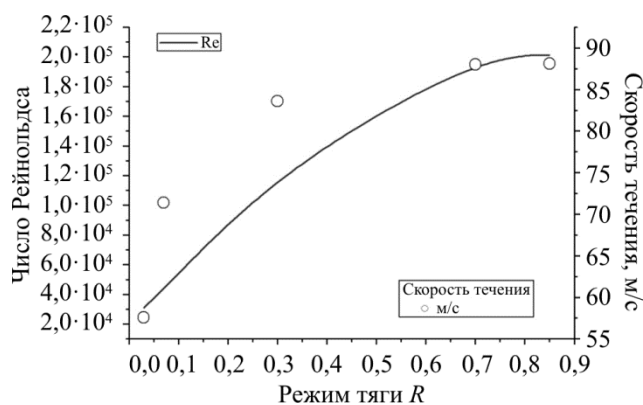


Рис. 6. Изменение линейной скорости потока и чисел Рейнольдса в зависимости от режима тяги

На рис. 5 представлены результаты измерения аэрозольной характеристики штатной магистрали отбора газовых проб на стенде, проведенные в нормальных условиях без обогрева. Измерения показали высокую долю потерь частиц диаметром менее 100 нм.

Для учета потерь в тракте используется приближение Хиндса (Hinds) [12], экспериментально подтвердившее точность в 1 % для частиц диаметром от 5 нм [13] непосредственно в пробоотборных линиях. Коэффициент прохождения Tr через цилиндрическую трубу длиной L и диаметром dt определяется соотношением частиц на выходе N_{Out} и входе N_{In} :

$$Tr = \frac{N_{Out}}{N_{In}} = \exp\left(\frac{-4V_d L}{dt \bar{U}}\right),$$

где U – средняя скорость потока газа, а V_d – скорость оседания частиц, вычисляемая согласно формуле

$$V_d = \frac{0,04 \bar{U}}{Re^{1/4}} \left(\frac{\rho_g D}{\eta}\right)^{2/3},$$

здесь ρ_g и η – плотность и вязкость газа, несущего поток частиц.

Применение турбулентной модели Хиндса для учета потерь частиц и вычисления пропускной характеристики пробоотборной линии обусловлено высокими числами Рейнольдса на всех режимах выполненных испытаний. На рис. 6 приведено изменение линейной скорости потока и чисел Рейнольдса в зависимости от режима тяги. При этих параметрах проба проскакивает всю забор-

ную трубку за доли секунды, а Рейнольдс превышает 10^4 , т.е. режим течения сильно турбулентный.

Согласно расчету потери, обусловленные турбулентной диффузией частиц на стенки измерительного тракта, составляют до 90 % для частиц диаметром 5 нм и 10 % для диаметром частиц 100 нм. Полученная характеристика потерь тракта для режима испытаний использовалась в качестве нормировки для распределения частиц по размерам при вычислении реального фракционного состава частиц в продуктах эмиссии.

Результаты определения фракционного состава частиц в продуктах сгорания

Объектом исследования при выполнении измерений являлся сектор камеры сгорания авиационного газотурбинного двигателя гражданской авиации в составе испытательного отсека. Испытания выполнялись для режимов, приближенных к режимам стандартного взлетно-посадочного цикла³. В авиационном двигателестроении принято характеризовать режим работы двигателя в долях взлетной мощности R . Режим земного малого газа обозначается $R = 0,03$, взлетный режим – $R = 1$. По результатам измерений в продуктах эмиссии обнаружено до нескольких миллионов частиц в кубическом сантиметре. Дисперсный состав во всех режимах представлен двумя фракциями диаметром <10 и $10-100$ нм, при этом соотношение их счетного вклада в среднем составляет 1 к 6 соответственно (рис. 7, а). Счетная концентрация с ростом тяги снижается на порядок с 10^7 до 10^6 частиц в кубическом сантиметре пробы. Среднеарифметический размер частиц вначале существенно снижается с увеличением режима тяги с 62 до 40 нм, а после режима $R = 0,7$ (70 % от взлетной тяги двигателя) отмечается подъем до 51 нм (рис. 7, б).

Результаты определения химического состава

При идентификации полиароматических соединений в суммарной пробе $R = 0,03 + 0,07$ установлены: флуорен, фенантрен, антрацен и пирен. Во всех остальных только фенантрен и пирен. Значения концентрации приведены в таблице.

Содержание полиароматических углеводородов в пробе

Название	Формула	Режим			
		0,03 + 0,07	0,3	0,7	0,85
Флуорен	$C_{13}H_{10}$	0,00016	–	–	–
Фенантрен	$C_{14}H_{10}$	0,01918	0,00362	0,00524	0,00116
Антрацен	$C_{14}H_{10}$	0,00060	–	–	–
Пирен	$C_{16}H_{10}$	0,00120	0,00308	0,00103	0,00165

С увеличением тяги наблюдался шестикратный рост массовой концентрации нормальных углеводородов (с $0,042$ до $0,269$ мкг/м³) при одновременном их утяжелении, возможно вследствие улучшения условий выгорания меньших молекул. При переходе с режима $R = 0,03$ к режиму $R = 0,85$ максимум в распределении смещался с C_{19} (нонадекан) к C_{25} (пентакозан). На рис. 8 приведены в относительной шкале относительные концентрации нормальных углеводородов в пробе для различных режимов. При рассмотрении относительного вклада нормальных углеводородов в состав сажи с увеличением тяги наблюдался рост с $0,008$ до $0,14$ % м/м.

На рис. 9 построены гистограммы концентраций нормальных углеводородов в составе несгоревшего керосина (анализ состава был выполнен в рамках работы) и концентраций нормальных углеводородов в составе сажи, отобранной для анализа. На рисунке также обозначены индексы эмиссии сажи в миллиграммах на килограмм сгоревшего топлива, примерно соответствующие эксплуатационным режимам $R = 0,03...1$ и указывающие на возможную взаимосвязь образования сажи и наличия тяжелых углеводородов в керосине. Тяжелые углеводороды горят плохо и чем тяжелее, тем хуже. Они же в условиях неполного сгорания формируют полиароматические углеводороды – крайне нежелательные продукты в выхлопе из-за своих канцерогенных свойств.

³ Прил. 16 к Конвенции о международной гражданской авиации «Охрана окружающей среды». Т. II. Эмиссия авиационных двигателей. 2008. 118 с.

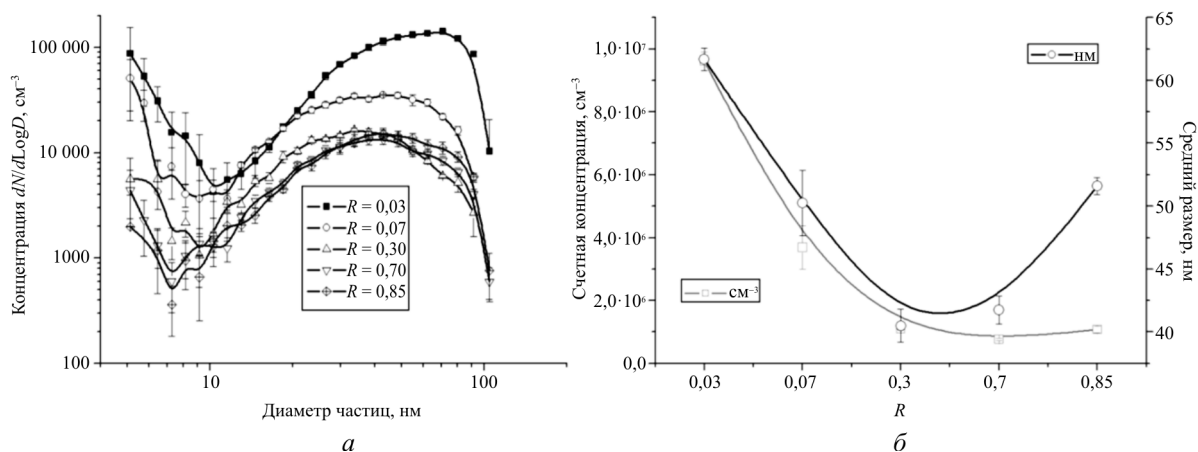


Рис. 7. Фракционный состав нелетучих частиц с учетом потерь в пробоотборной магистрали, соответствующий различным режимам испытаний сектора камеры сгорания (а), и счетная концентрация и средний размер частиц, соответствующие различным режимам испытаний сектора камеры сгорания (б)

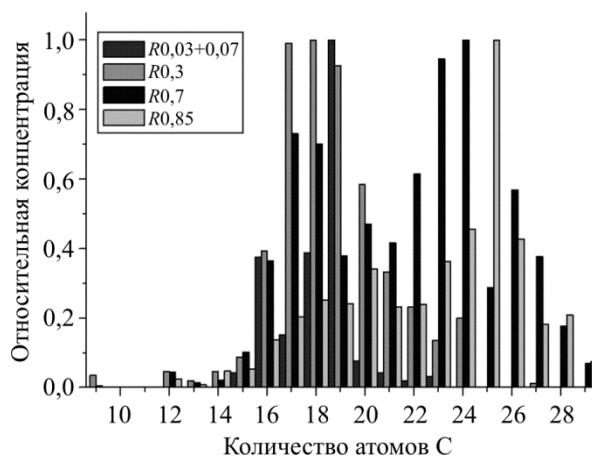


Рис. 8. Относительное содержание нормальных углеводородов в составе нелетучих частиц при испытании сектора камеры сгорания на различных режимах тяги

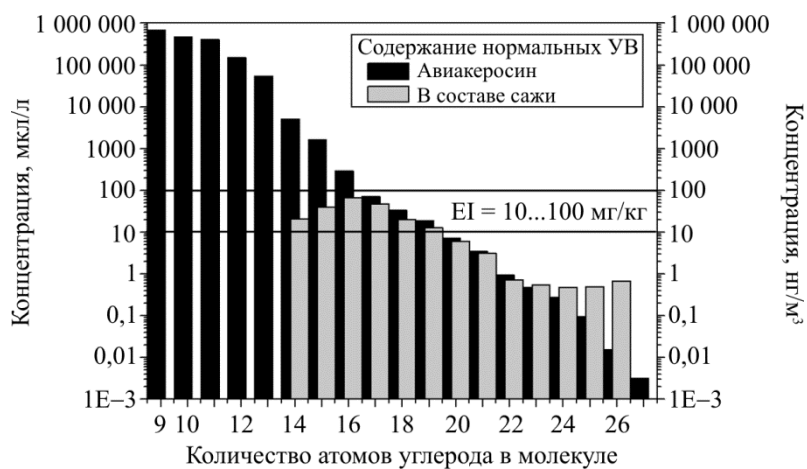


Рис. 9. Концентрации нормальных углеводородов в составе несгоревшего керосина и концентрации нормальных углеводородов в составе сажи

Заключение

В ходе работ создан и апробирован комплекс оборудования для определения фракционного и химического состава аэрозольных продуктов сгорания (нелетучих частиц) авиационного керосина в воздухе с использованием стандартизованных ИКАО методов отбора, транспортирования и подготовки пробы для газового анализа.

В результате исследований построена функция потерь частиц в линии, после чего были восстановлены истинные распределения частиц в пробе при испытаниях отсека при имитации режимов от малого газа до 85 % взлетного.

Был определен также химический состав органических веществ нелетучих частиц, которые улавливались специальным тефлоновым фильтром и последующим исследованием пробы с помощью газового хромато-масс-спектрометра в ИХКГ. С увеличением тяги наблюдался шестикратный рост массовой концентрации нормальных углеводородов (с 0,042 до 0,269 мкг/м³) при одновременном их утяжелении, возможно вследствие улучшения условий выгорания легких молекул. При переходе с режима $R = 0,03$ к $R = 0,85$ максимум в распределении смещается с C_{19} (нонадекан) к C_{25} (пентакозан).

Библиографический список

1. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment / T.C. Bond, S.J. Doherty, D.W. Fahey [et al.] // *J. Geophys. Res. Atmos.* – 2013. – No. 118. – P. 5380–5552.
2. Finlayson-Pitts B.J., Pitts J.N. Tropospheric air pollution: Ozone, airborne toxics, poly-cyclic aromatic hydrocarbons, and particles // *Science*. – 1997. – No. 276. – P. 1045–1052.
3. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / P. Forster, V. Ramaswamy, P. Artaxo [et al.]. – Cambridge: Cambridge University Press, 2007. – 234 p.
4. Association of particulate air pollution and acute mortality: involvement of ultrafine particles? / G. Oberdorster, R.M. Gelein, J. Ferin, B. Weiss // *Inhal Toxicol.* – 1995. – Vol. 1, no. 7. – P. 111–124.
5. Righi M., Hendricks J., Sausen R. The global impact of the transport sectors on atmospheric aerosol in 2030. Part 2: Aviation // *Atmos. Chem. Phys.* – 2016. – No. 16. – P. 4481–4495.
6. Study on sampling and measurement of aircraft particulate emissions / A. Petzold, R. Marsh, M. Johnson [et al.]; European Aviation Safety Authority. – European, 2009. – 140 p.
7. Studying, sampling and measurement of aircraft particulate emissions II / R. Marsh, A. Crayford, A. Petzold [et al.]; European Aviation Safety Agency. – European, 2011. – 140 p.
8. Sample 3 SC.01: Contribution to aircraft engine PM certification requirement and standard / A. Crayford, M. Johnson, R. Marsh [et al.]. European Aviation Safety Authority. – European, 2011. – 163 p.
9. Measuring non-volatile particle properties in the exhaust of an aircraft engine / K. Ortega, D. Delhaye, F.-X. Ouf, D. Ferry [et al.] // *J. Aerosp. Lab. Challenges in Combustion for Aerosp. Propul.* – June 2016. – Iss. 11. – P. 14.
10. Измерение фракционного и химического состава нелетучих частиц в продуктах эмиссии камеры сгорания авиационного газотурбинного двигателя / А.А. Иноземцев, А.Н. Саженков, А.М. Сипатов, В.В. Цатиашвили, Т.В. Абрамчук, А.К. Петров, С.Б. Малышкин, Л.В. Куйбида, А.С. Козлов, М.В. Панченко, В.С. Козлов // *Оптика атмосферы и океана*. – 2016. – Т. 29, № 6. – С. 503–507.
11. Characterization of aviation soot emissions with a high-pressure gas turbine combustor rig / D.S. Liscinsky, Yu. Zhenhong, A. Jennings, J. Peck, B. True, A. Freedman, S.C. Herndon, R.C. Miake-Lye // *Proceed. of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Techn. Conf. and Expos.* – June 16–20, 2014. – 2010. – GT2014-25226. – 10 p.
12. Hinds W.C. Aerosol technology: properties, behavior and measurement of airborne particles. – UK: John Wiley & Sons, 1999. – 504 p.
13. Treatment for the losses of aerosol particles in long sampling tubes during ambient particle measurements / P. Kumar, P. Fennell, J. Symonds, R. Britter // *Atmosph Environ.* – 2008. – No. 42. – P. 8819–8826.

References

1. Bond T.C., Doherty S. J., Fahey D. W. et.al. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2013, no. 118, pp. 5380-5552.
2. Finlayson-Pitts, B.J. and Pitts, J.N. Tropospheric air pollution: Ozone, airborne toxics, poly-cyclic aromatic hydrocarbons, and particles. *Science*, 1997, no.276, pp. 1045-1052.
3. Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P., et.al. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, 2007, pp. 129-234.
4. Oberdorster G., Gelein R.M., Ferin J., Weiss B. Association of particulate air pollution and acute mortality: involvement of ultrafine particles? *Inhal Toxicol*, 1995, no.7, Vol. 1, pp. 111-124.
5. Mattia Righi, Johannes Hendricks, and Robert Sausen. The global impact of the transport sectors on atmospheric aerosol in 2030 – Part 2: Aviation. *Atmos. Chem. Phys.*, 2016, no. 16, pp. 4481- 4495.
6. Petzold A., Marsh R., Johnson M., et.al. Study on Sampling and Measurement of Aircraft Particulate Emissions. European Aviation Safety Authority, 2009, 140 p.
7. Marsh R., Crayford A., Petzold A., et.al. Studying, Sampling and Measurement of Aircraft Particulate Emissions II. European Aviation Safety Agency, 2011, 140 p.
8. Crayford A., Johnson M., Marsh R., et.al. Sample 3 SC.01: Contribution to Aircraft Engine PM Certification Requirement and Standard. European Aviation Safety Authority, 2011, 163 p.
9. Ortega I.K., Delhaye D., Ouf F.-X., Ferry D. et.al. Measuring Non-Volatile Particle Properties in the Exhaust of an Aircraft Engine. *Journal AerospaceLab. Challenges in Combustion for Aerospace Propulsion*, Issue 11, June 2016, 14 p.
10. Inozemtsev A.A., Sazhenkov A.N., Sipatov A.M., Tsatiashvili V.V., Abramchuk T.V., Petrov A.K., Malyshkin S.B., Kuybida L.V., Kozlov A.S., Panchenko M.V., Kozlov V.S. Izmereniye fraktsionnogo i khimicheskogo sostava neletuchikh chastits v produktakh emissii kamery sgoraniya aviatsionnogo gazoturbinnogo dvigatelya [Measurement of the fractional and chemical composition of non-volatile particles in the emission products of the combustion chamber of an aircraft gas turbine engine]. *Optika Atmosfery i Okeana*, 2016, vol. 29, no. 6, pp. 503-507.
11. Liscinsky D.S., Zhenhong Yu, Jennings A., Peck J., True B., Freedman A., Herndon S.C., Mlake-Lye R.C. Characterization of aviation soot emissions with a high-pressure gas turbine combustor rig. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition*, June 16 – 20, 2014, GT2014-25226, 10 p.
12. Hinds W.C. Aerosol technology: properties, behavior and measurement of airborne particles. John Wiley & Sons, UK, 1999, 504 p.
13. Kumar P., Fennell P., Symonds J., Britter R., Treatment for the losses of aerosol particles in long sampling tubes during ambient particle measurements. *Atmospheric Environment*, 2008, no. 42, pp. 8819-8826.

Об авторах

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

Сипатов Алексей Матвеевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, начальник отдела камер сгорания АО «ОДК-Авиадвигатель» (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 93; e-mail: sipatov@avid.ru).

Цатиашвили Вахтанг Валерьевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, начальник конструкторского отдела камер сгорания АО «ОДК-Авиадвигатель» (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 93; e-mail: tsatiashvili@avid.ru).

Абрамчук Тарас Викторович (Пермь, Россия) – заместитель начальника отдела камер сгорания АО «ОДК-Авиадвигатель» (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 93; e-mail: abramchuk-tv@avid.ru).

Петров Александр Константинович (Новосибирск, Россия) – доктор химических наук, профессор лаборатории лазерной фотохимии, Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН (630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, д. 3; e-mail: petrov@kinetics.nsc.ru).

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

Панченко Михаил Васильевич (Томск, Россия) – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории оптики аэрозоля, Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (634055, Россия, г. Томск, площадь Академика Зуева, д. 1; e-mail: pmv@iao.ru).

About the authors

Aleksey N. Sazhenkov (Perm, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences, Assistant Managing Director – Head of the Administrative Department, JSC “UEC-Aviadvigatel” (93, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: sazhenkov@avid.ru).

Aleksey M. Sifatov (Perm, Russian Federation) – Doctor in Technical Sciences, Head of Combustion Chambers Department, JSC “UEC-Aviadvigatel” (93, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: sifatov@avid.ru).

Vakhtang V. Tsatiashvili (Perm, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences, Head of the Combustion Chambers Design Department, JSC “UEC-Aviadvigatel” (93, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: tsatiashvili@avid.ru).

Taras V. Abramchuk (Perm, Russian Federation) – Deputy Head of Combustion Chambers Department, JSC “UEC-Aviadvigatel” (93, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: abramchuk-tv@avid.ru).

Aleksandr K. Petrov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Chemical Sciences, Professor of Laboratory of Laser Photochemistry, Institute of Chemical Kinetics and Combustion named after V.V. Voevodsky, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (3, Institutskaya st., Novosibirsk, 630090, Russian Federation; e-mail: petrov@kinetics.nsc.ru).

Aleksandr S. Kozlov (Perm, Russian Federation) – CSc in Chemical Sciences, Professor of Laboratory of Laser Photochemistry, Institute of Chemical Kinetics and Combustion named after V.V. Voevodsky, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (3, Institutskaya st., Novosibirsk, 630090, Russian Federation; e-mail: kozlov@kinetics.nsc.ru).

Mikhail V. Panchenko (Perm, Russian Federation) – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Researcher of Laboratory of Aerosol Optics, Institute of Atmospheric Optics named after V.E. Zuev, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (1, Akademika Zuyeva sqr, Tomsk, 634055, Russian Federation; e-mail: pmv@iao.ru).

Получено 17.07.2020