

УДК 629.7.036.34

Измерение фракционного и химического состава нелетучих частиц в продуктах эмиссии камеры сгорания авиационного газотурбинного двигателя

А.А. Иноземцев¹, А.Н. Саженов¹, А.М. Сипатов¹, В.В. Цатиашвили¹,
Т.В. Абрамчук¹, А.К. Петров², С.Б. Малышкин², Л.В. Куйбида²,
А.С. Козлов², М.В. Панченко³, В.С. Козлов^{3*}

¹ОАО «Авиадвигатель»

614000, г. Пермь, Комсомольский пр., 93

²Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН
630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3

³Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 21.01.2016 г.

Впервые представлены результаты экспериментальных исследований химического и фракционного состава нелетучих частиц в диапазоне размеров 10–1100 нм в продуктах сгорания. Исследования выполнены в условиях высокопараметрического автономного стенда испытаний камер сгорания авиационных газотурбинных двигателей с применением специального оборудования для измерения фракционного состава частиц в темпе проведения стендовых испытаний. Исследование химического состава осажденных на фильтре частиц осуществлялось лабораторными методами.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, эмиссия, нелетучие частицы, камера сгорания; gas turbine engine, emission, particular matter, combustor chamber.

Введение

В 2016 г. на отчетном собрании комитета Международной организации гражданской авиации (ИКАО) [1] по защите окружающей среды будут представлены предложения по утверждению нового стандарта на эмиссию нелетучих частиц авиационными газотурбинными двигателями (ГТД). Под нелетучими частицами принято понимать ультрадисперсные аэрозоли на основе частиц сажи размерами от нескольких нанометров до нескольких микрон. Нормирование вводится с целью сокращения негативного влияния на качество воздуха в районе аэропортов и на климат Земли [2–5].

Принятие стандарта обяжет производителей авиационных двигателей строго соблюдать его, аналогично уже действующим сертификационным требованиям, например по эмиссии оксидов азота.

На западе эмиссии нелетучих частиц уделяется пристальное внимание и к настоящему времени имеются базы данных по эмиссии нелетучих частиц для большинства современных и планируемых к серийному производству двигателей [6–8]. По отечественным двигателям подобных баз данных нет, экспериментальные исследования характеристик эмиссии нелетучих частиц в продуктах сгорания авиационных ГТД не проводятся.

Целью исследования являлось определение 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 рамках формирования методики измерения содержания нелетучих частиц в продуктах сгорания камеры сгорания ГТД работа была разбита на несколько этапов:

1) оценка потерь нелетучих частиц в существующих стендовых линиях подачи проб на газовый анализ;

* Александр Александрович Иноземцев (office@avid.ru); Алексей Николаевич Саженов (sazhenkov@avid.ru); Алексей Матвеевич Сипатов (sipatov@avid.ru); Вахтанг Валерьевич Цатиашвили (tsatiashvili@avid.ru); Тарас Викторович Абрамчук (abramchuk-tv@avid.ru); Александр Константинович Петров (petrov@kinetics.nsc.ru); Сергей Борисович Малышкин (msb@ngs.ru); Леонид Васильевич Куйбида (kuibida@kinetics.nsc.ru); Александр Сергеевич Козлов (kozlov@kinetics.nsc.ru); Михаил Васильевич Панченко (pmv@iao.ru); Валерий Степанович Козлов (vkozlov@iao.ru).

2) восстановление 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 ОАО «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.

Оценка потерь нелетучих частиц

Для регистрации количества и концентрации микрочастиц в потоке продуктов сгорания использовалась аппаратура Института химической кинетики и горения (ИХКГ). Блок аппаратуры представляет собой электростатический классификатор (колонка) с конденсационным счетчиком частиц SMPS+C (GRIMM Aerosol Technik, ФРГ).

Для работы представленной аппаратуры фактические концентрации частиц в пробе слишком велики, и общепринятым способом является кратное разбавление пробы чистым газом без примесей. Западные исследователи используют вдвух горячего (160 °С) азота в пробоотборную линию и дополнительный насос откачки в конце линии для компенсации введенного в пробу разбавителя. На стенде ОАО «Авиадвигатель» для разбавления пробы предложен оригинальный способ, суть которого заключается в использовании в качестве разбавляющего газа части исходной пробы, очищенной на тонком фильтре от частиц.

Существующие линии отбора проб на испытательных стендах ОАО «Авиадвигатель» предназначены для отбора проб газов согласно Авиационным правилам П. 34 [9] 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 (максимум 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 более 1000 нм за счет гравитационного осаждения (седиментации). Существуют и другие механизмы потерь частиц при движении полидисперсной смеси в каналах [10]. В результате движения по каналам размерное распределение частиц искажается, и требуется его восстановление.

На рис. 1 представлены результаты измерений 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.

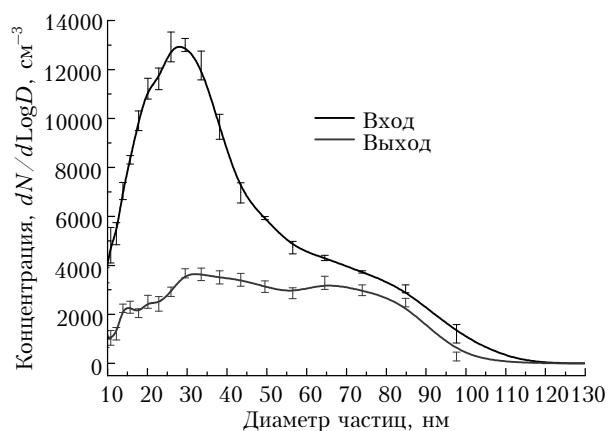


Рис. 1. Распределение концентрации аэрозольных частиц по размерам на входе и на выходе из пробоотборной линии при нормальных условиях без обогрева для объемного расхода воздуха 0,3 л/мин

Для учета потерь в тракте используется приближение Хиндса (Hinds) [11], экспериментально подтвердившее точность в 1% для частиц диаметром от 5 нм [12] непосредственно в пробоотборных линиях. Коэффициент прохождения Tr через цилиндрическую трубу длиной L и диаметром d_t определяется соотношением частиц на выходе N_{out} и входе N_{in} :

$$Tr = \frac{N_{out}}{N_{in}} = \exp\left(\frac{-4V_d L}{d_t \bar{U}}\right), \quad (1)$$

где \bar{U} – средняя скорость потока газа; V_d – скорость оседания частиц, вычисляемая согласно

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

Здесь ρ_g и η – плотность и вязкость газа, несущего поток частиц; D – коэффициент диффузии частиц; Re – число Рейнольдса.

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. 2 приведено изменение линейной скорости потока и чисел Рейнольдса в зависимости от режима тяги. При этих параметрах проба проскакивает всю заборную трубку за доли секунды, а число Рейнольдса 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 100 нм частиц. Полученная характеристика потерь тракта для режима испытаний использовалась в качестве нормировки для

распределений частиц по размерам при вычислении реального фракционного состава частиц в продуктах эмиссии.

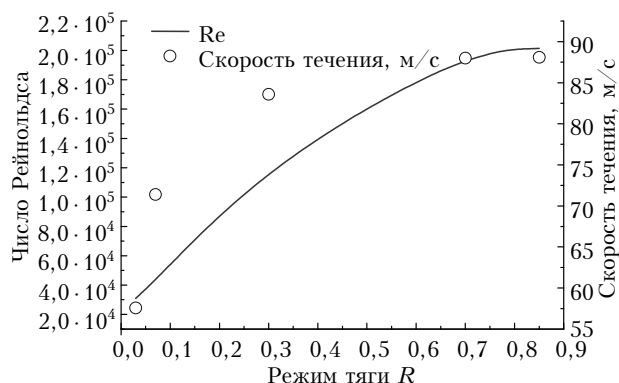


Рис. 2. Изменение скорости течения и чисел Рейнольдса в зависимости от режима тяги

Результаты определения фракционного состава частиц в продуктах сгорания

Объектом исследования при выполнении измерений являлся сектор камеры сгорания авиационного ГТД гражданской авиации в составе испытательного отсека. Испытания выполнялись для режимов, приближенных к режимам стандартного взлетно-посадочного цикла [1]. 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 нм и $10–100$ нм, при этом соотношение их счетного вклада в среднем составляет 1 к 6 соответственно (рис. 3, 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. 3, б).

Результаты определения химического состава нелетучих продуктов сгорания

Для определения химического состава использовался газовый хроматограф Agilent 6890N с масс-селективным детектором (масс-спектрометром) Agilent 5973N. Для упрощения идентификации веществ используются библиотеки масс-спектров NIST-11 (410 тыс. соединений) со структурными формулами (314 тыс. формул).

Отбор газовых проб (50–1000 л) осуществлялся на тефлоновые аналитические мембраны (Grimm 1.113A, поверхность 20 см^2 , 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 $50–250 \text{ }^\circ\text{C}$ со скоростью $5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$, 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 (таблица) включая некоторые полихлорированные углеводороды (Supelco: EPA PAH 525 MixB, PAH 525 semivolatile). Проведена калибровка прибора, определены времена 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.

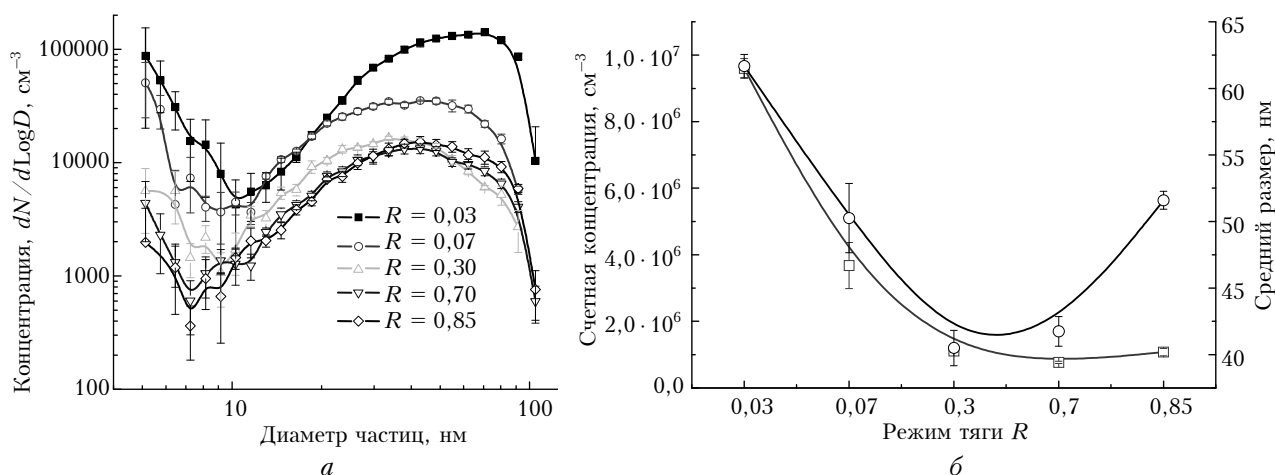


Рис. 3. Фракционный состав нелетучих частиц с учетом потерь в пробоотборной магистрали, соответствующий различным режимам испытаний сектора камеры сгорания (а); счетная концентрация (квадраты) и средний размер частиц (кружки) в различных режимах испытаний сектора камеры сгорания (б)

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 ($\text{мкг}/\text{м}^3$) приведены в таблице.

Содержание полиароматических углеводородов в пробе

Название	Формула	Режим тяги			
		0,03 + 0,07	0,30	0,70	0,85
Флуорен	$\text{C}_{13}\text{H}_{10}$	0,00016	—	—	—
Фенантрен	$\text{C}_{14}\text{H}_{10}$	0,01918	0,00362	0,00524	0,00116
Антрацен	$\text{C}_{14}\text{H}_{10}$	0,00060	—	—	—
Пирен	$\text{C}_{16}\text{H}_{10}$	0,00120	0,00308	0,00103	0,00165

С увеличением тяги наблюдается шестикратный рост массовой концентрации нормальных углеводородов (с 0,042 до 0,269 $\text{мкг}/\text{м}^3$) при одновременном их утяжелении, возможно вследствие улучшения условий выгорания меньших молекул. При переходе с режима тяги $R = 0,03$ к $R = 0,85$ максимум в распределении смещается с C19 (нонадекан) к C25 (пентакозан). На рис. 4 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 наблюдается рост с 0,008 до 0,14% м/м.

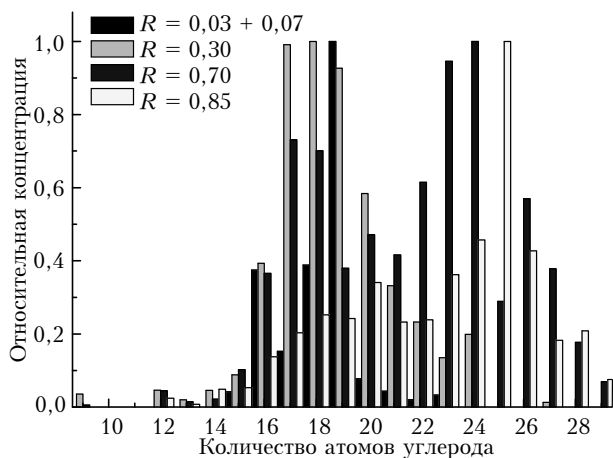


Рис. 4. Относительное содержание нормальных углеводородов в составе нелетучих частиц при испытании сектора камеры сгорания на различных режимах тяги

На рис. 5 построены гистограммы концентраций нормальных углеводородов в составе несгоревшего керосина (анализ состава был выполнен в рамках работы) и сажи, отобранной для анализа. Также на рисунке 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.

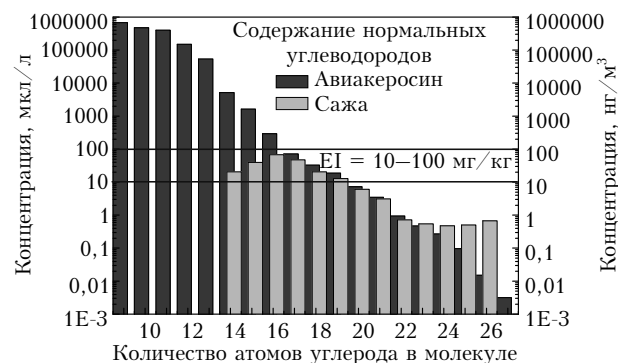


Рис. 5. Концентрации нормальных углеводородов в составе несгоревшего керосина и сажи

Заключение

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

Также был определен химический состав органических веществ нелетучих частиц, которые улавливались специальным тефлоновым фильтром, затем проводилось исследование пробы с помощью газового хромато-масс спектрометра в Институте химической кинетики и горения. С увеличением тяги наблюдается шестикратный рост массовой концентрации нормальных углеводородов (с 0,042 до 0,269 $\text{мкг}/\text{м}^3$) 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 C19 (нонадекан) к C25 (пентакозан).

1. Приложение 16 к Конвенции о международной гражданской авиации «Охрана окружающей среды». Т. II «Эмиссия авиационных двигателей» / Международная организация гражданской авиации. 3-е изд. 2008. URL: airspot.ru/book/file/595/an16_v2_cons.ru.pdf
2. Finlayson-Pitts B.J., Pitts J.N. Tropospheric air pollution: Ozone, airborne toxics, poly-cyclic aromatic hydrocarbons, and particles // Science. 1997. V. 276, iss. 5315. P. 1045–1052.
3. Forster P., Ramaswamy V., Artaxo P., Berntsen T., Betts R., Fahey D.W., Haywood J., Lean J., Lowe D.C., Myhre G., Nganga J., Prinn R., Raga G., Schulz M., Van Dorland R. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller (eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2007. P. 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. V. 1, N 7. P. 111–124.
5. Bond T.C., Doherty S.J., Fahey D.W., Forster P.M., Berntsen T., DeAngelo B.J., Flanner M.G., Ghan S., Kärcher B., Koch D., Kinne S., Kondo Y., Quinn P.K., Sarofim M.C., Schultz M.G., Schulz M., Venkatara-

- man C., Zhang H., Zhang S., Bellouin N., Guttikunda S.K., Hopke P.K., Jacobson M.Z., Kaiser J.W., Klimont Z., Lohmann U., Schwarz J.P., Shindell D., Storelomo T., Warren S.G., Zender C.S. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment // *J. Geophys. Res. A.* 2013. V. 118, iss. 11. P. 5380–5552.
6. Petzold A., Marsh R., Johnson M., Miller M., Sevcenco Y., Delhaye D., Vancassel X., Ibrahim A., Veira A., Williams P., Bauer H., Crayford A., Morris S., Kay P., Bowen P., Bachalo W.D., Raper D. Study on Sampling and Measurement of Aircraft Particulate Emissions. European Aviation Safety Authority, 2009.
 7. Marsh R., Crayford A., Petzold A., Johnson M., Williams P., Ibrahim A., Kay P., Morris S., Delhaye D., Lottin X., Vancassel D., Raper S., Christie M., Bennett M., Miller D., Sevcenco Y., Rojo C., Coe H., Bowen P. Studying, Sampling and Measurement of Aircraft Particulate Emissions II. European Aviation Safety Agency, 2011.
 8. Crayford A., Johnson M., Marsh R., Sevcenco Y., Walters D., Williams P., Christie S., Chung W., Petzold A., Ibrahim A., Delhaye D., Quincey P., Bowen P., Coe H., Raper D., Wilson C. Sample 3 SC.01: Contribution to Aircraft Engine PM Certification Requirement and Standard. European Aviation Safety Authority, 2011.
 9. *Авиационные правила.* Ч. 34. Эмиссия загрязняющих веществ авиационными двигателями. Нормы и испытания / Межгосударственный авиационный комитет. 2003. 84 с.
 10. Liscinsky D.S., Zhenhong Yu, Jennings A., Peck J., True B., Freedman A., Herndon S.C., Miake-Lye R.C. Characterization of aviation soot emissions with a high-pressure gas turbine combustor rig // Proc. of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition. June 16–20, 2014. Düsseldorf, Germany.
 11. Hinds W.C. Aerosol technology: Properties, behavior and measurement of airborne particles. John Wiley & Sons, UK, 1999. 504 p.
 12. Kumar P., Fennell P., Symonds J., Britter R. Treatment for the losses of aerosol particles in long sampling tubes during ambient particle measurements // *Atmos. Environ.* 2008. V. 42, iss. 38. P. 8819–8826.

A.A. Inozemtsev, A.N. Sahzenkov, A.M. Sipatov, V.V. Tsatiashvily, T.V. Abramchuk, A.K. Petrov, S.B. Malyshkin, L.V. Kuibida, A.S. Kozlov, M.V. Panchenko, B.S. Kozlov. **Measurements of fractional and chemical composition of non-volatile particles in emission products of aviation engine combustion chambers.**

The experimental investigation results of chemical and fractional composition of non-volatile matter in size ranges from 10 to 1100 nm for 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. Composition analysis of probes collected on filter was performed in laboratory way.