

Некоторые вопросы эмиссии дыма и нелетучих твердых частиц авиационными турбореактивными двухконтурными двигателями

Васильев А.Ю., Строкин В.Н., Шилова Т.В.

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва

e-mail: tvshilova@ciam.ru

В статье кратко рассмотрены нормы ИКАО на эмиссию дыма и выбросы нелетучих твердых частиц (нЛТЧ) авиационными турбореактивными двухконтурными двигателями. Дан сравнительный анализ норм на нЛТЧ и дымление и рассмотрены различные формулы физической связи между концентрацией нЛТЧ и параметром дымности SN. Рассмотрены экспериментальные данные об эмиссии нЛТЧ и дымлении современных зарубежных двигателей и их соответствие нормам ИКАО. Проведен анализ влияния различных параметров на выбросы дыма современными двигателями. Рассмотрен вопрос о размере нЛТЧ и предложена функция распределения частиц по размерам.

Ключевые слова: эмиссия, нелетучие твердые частицы, дым, нормы ИКАО, размер частиц

Some issues related to the emission of non-volatile particulate matter and smoke by aircraft turbofan engines

Vasiliev A.Yu., Strokin V.N., Shilova T.V.

CIAM, Moscow

This article briefly reviews the ICAO standards for non-volatile particulate matter (nvPM) emissions and smoke for aircraft turbofan engines. A comparative analysis of the standards for nvPM and smoke is given, and various formulas for the physical relationship between the concentration of nvPM and the smoke parameter SN are considered. Experimental data on nvPM and smoke produced by modern foreign engines and their compliance with ICAO standards are considered. An analysis of the influence of various parameters on smoke emissions by modern engines was carried out. The issue of nvPM particle size is considered and a proposal is made for the particle size distribution function.

Keywords: emissions, non-volatile particulate matter, smoke, ICAO standards, particle size

О нормах ИКАО на эмиссию нелетучих твердых частиц и дымление

1 января 2020 года вступил в действие новый стандарт Международной организации гражданской авиации (ИКАО) на эмиссию нелетучих твердых частиц (нЛТЧ) [1, с. III-4-2]. Положения этого стандарта применяются в отношении всех авиационных двигателей, предназначенных для обеспечения полетов на дозвуковых скоростях. Эмиссия нЛТЧ определяется при стандартном взлетно-посадочном цикле (ВПЦ) для дозвуковых самолетов. Положения стандарта применяются ко всем двухконтурным (ТРДД) и одноконтурным турбореактивным двигателям типа или модели и к их производным

вариантам с расчетной тягой более 26,7 кН, конкретный экземпляр которых изготовлен 1 января 2020 года или позже.

Нелетучие твердые частицы, визуально фиксируемые как дым на выходе из сопла двигателя самолета, являются весьма малыми образованиями с размерами менее микрона, что меньше размеров частиц табачного дыма (0,1...1,3 мкм). Для их определения ИКАО разработала не только новый стандарт, но и новое, сложное приборное обеспечение [1]. На сегодняшний день в России нет сертифицированного ИКАО оборудования (утвержденного типа) для измерения эмиссии нЛТЧ. Приобретение зарубежного и создание отечественного, сертифицированного ИКАО оборудования – задача

важная для ускорения темпов развития гражданской авиации в России.

По стандарту на эмиссию нЛГЧ основными определяемыми и нормируемыми параметрами являются массовый индекс эмиссии (EI_{mass} , мг/кг топлива), численный индекс эмиссии (EI_{num} , частиц/кг топлива), а также массовая концентрация ($nvPM_{mass}$, мкг/м³ газа). Испытания двигателя должны производиться на режимах ВПЦ, достаточных для экспериментального определения EI_{mass} и EI_{num} и затем расчета $nvPM_{mass}$, а также на режимах тяги, создающих максимальные EI_{mass} , EI_{num} и $nvPM_{mass}$. Когда условия испытаний отличаются от стандартных атмосферных условий, индексы приводят к температуре на входе в камеру сгорания двигателя при стандартных атмосферных условиях.

В отчете CAEP/11 [2] предлагаются дополнения к нормам ИКАО, в частности в отношении нелетучих частиц предлагается, учитывая расход топлива, время режима и взлетную тягу (F_{00}), определять средние по ВПЦ относительные параметры LTO_{mass}/F_{00} (мкг/кН) и LTO_{num}/F_{00} (частиц/кН) и абсолютные значения выбросов LTO_{mass} (г) и LTO_{num} (частиц) за ВПЦ. Эти ненормируемые параметры также представлены в банке данных ИКАО [3] по результатам испытаний некоторых двигателей.

В соответствии с прежними нормами ИКАО при сертификации двигателей измеряли параметр дымления в процентах от почернения фильтра, установленного в магистрали для отбора газа на выходе из двигателя. Требования к числу дымности (SN), полученному на основе этих измерений, остались и в новой редакции норм ИКАО. Параметр SN и параметры эмиссии нЛГЧ связаны с одним и тем же физическим объектом – частицами дыма. Однако методика определения параметров эмиссии нЛГЧ [1] предусматривает ряд сложных манипуляций с отобранной пробой, в частности удаление летучих компонентов (при $T < 350^\circ\text{C}$) из общего потока.

Отметим здесь, что отечественные нормы на эмиссию газовых компонентов и дыма [4] базировались на прежних нормах ИКАО и не содержат требований по нелетучим частицам. Следует ожидать, что в ближайшем будущем они будут приведены в соответствие с нынешними нормами ИКАО. Учитывая бурное развитие за рубежом теоретических и экспериментальных исследований, посвященных теме нелетучих твердых частиц, отсутствие в России сертифицированного оборудования для измерения эмиссии нЛГЧ и обусловленное этим отставание в области изучения природы образования нЛГЧ, методов снижения эмиссии и методик ее измерения, в настоящее время целесообразно оценивать эмиссию нелетучих частиц авиационными двигателями по данным о выбросах дыма, используя существующие приборы.

Нормы ИКАО для параметров SN и $nvPM_{mass}$ (мкг/м³) заданы в виде функций от взлетной тяги (F_{00} , кН) [1]:

$$SN(F_{00}) = 83,6 F_{00}^{-0,274}, \text{ при } SN < 50; \quad (1)$$

$$PM(F_{00}) = 10^{(3 + 2,9F_{00}^{-0,274})}. \quad (2)$$

Представленные на рис. 1 данные показывают, что концентрация нЛГЧ падает при росте взлетной тяги до 50 кН в пять раз, в то время как число дымности – всего в 1,6 раза. Таким образом, поведение указанных параметров, определяющих физически один и тот же объект, имеет разный характер при изменении взлетной тяги.

Существует несколько формул для расчета концентрации нЛГЧ через число дымности:

$$PM1(SN) = \frac{648,4 \exp(0,0766 SN)}{1 + \exp[-1,098(SN - 3,064)]}; \quad (3)$$

$$PM2(SN) = 0,0694 SN^{1,23357}; \quad (4)$$

$$PM3(SN) = 10^{0,0347SN + 3,018}. \quad (5)$$

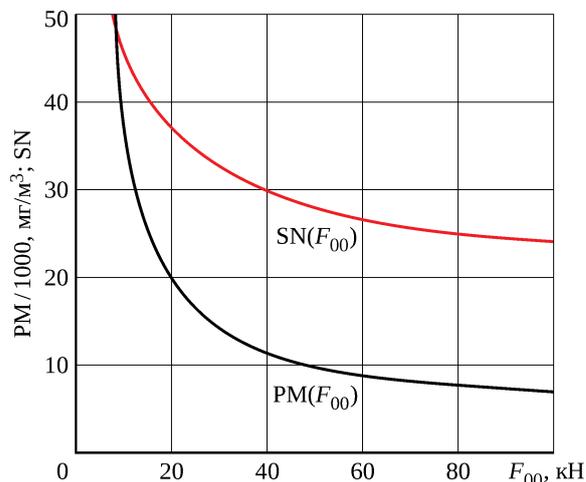


Рис. 1. Нормируемые значения числа дымности и концентрации нелетучих твердых частиц как функции взлетной тяги

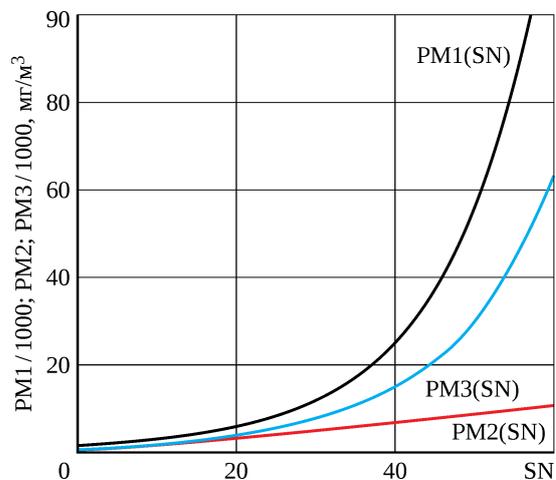


Рис. 2. Значения концентрации нелетучих твердых частиц как функции числа дымности

Табл. 1. Данные об измерениях эмиссии нелетучих твердых некоторых авиационных ТРДД

Двигатель	Камера сгорания	F_{00} , кН	m	π_k^*	$PM_{e_{max}}$, мкг/м ³	SNe_{max}	LTO_{mass}/F_{00} , мг/кН
CFM56-7B20E	Tech Insertion	91,6	5,5	22,4	707	8,66	40,3
LEAP-1B21	TAPS II	111,3	8,5	36,8	66	1,16	1,3
PW1127G-JM	Talon X	120,4	12,3	31,7	1442	6,79	53,7
GEnx-1B64/P2	TAPS	298	9,0	41,4	125	0,58	5,7
Trent 1000 (01P19RR113)	Phase5 Tiled	334,7	9,0	46	2649	14,7	137

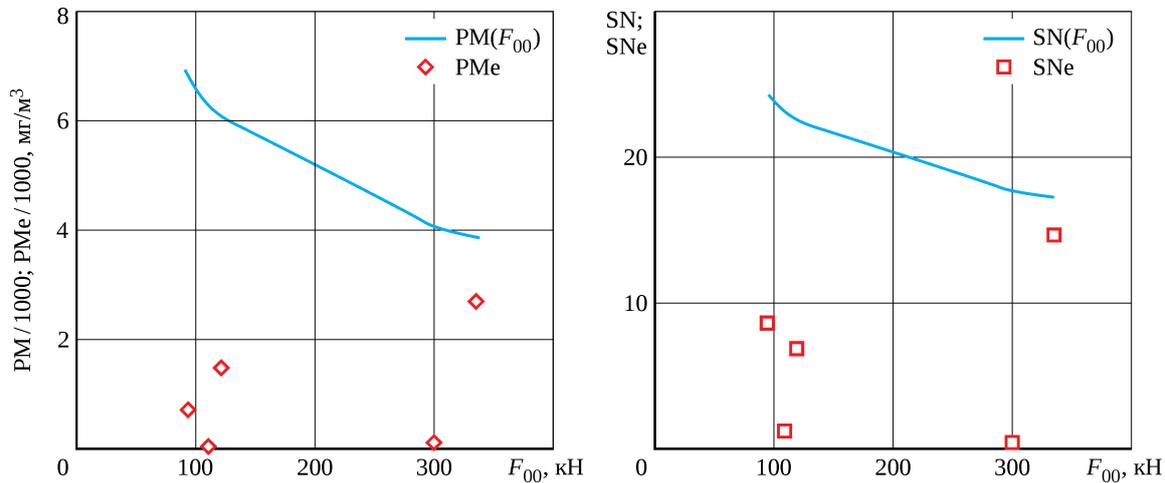


Рис. 3. Сравнение нормативных и максимальных экспериментальных значений концентрации нелетучих твердых частиц и числа дымности при изменении взлетной тяги для ряда двигателей

На рис. 2 построены кривые по формулам (3)–(5), для приведения к одной размерности величины $PM1$ и $PM3$ делятся на 1000. Указанные зависимости близки между собой только при малых значениях SN и расходятся при $SN > 25$. Таким образом, достаточно точный прогноз эмиссии нЛТЧ по числу дымности можно давать только в диапазоне $SN \leq 25$ и применяя разный коэффициент пересчета в зависимости от располагаемой тяги.

В базе данных ИКАО [3], в сводной таблице, уже сейчас приводятся первые, немногочисленные данные об измерениях эмиссии нЛТЧ для различных авиационных ТРДД. С использованием данных о пяти наиболее распространенных зарубежных двигателях составлена табл. 1, где, кроме параметров двигателей, приведены измеренные максимальные число дымности (SNe_{max}) и концентрация нЛТЧ ($PM_{e_{max}}$), полученные в пределах взлетно-посадочного цикла, а также средний по ВПЦ параметр LTO_{mass}/F_{00} . Двигатели имеют широкий диапазон параметров, оснащены камерами сгорания разного типа и, следовательно, имеют разные выбросы нЛТЧ и дыма. На рис. 3 эти данные сопоставлены с соответствующими нормами. Экспериментальные точки лежат ниже нормативных значений, т.е. все представленные двигатели удовлетворяют нормам. Однако отметим, что экспериментальные число дымности и концентрация нЛТЧ отличаются от норм по-разному: для $F_{00} < 200$ кН приблизительно в два раза и более

чем в три раза соответственно. На наш взгляд, это связано с гораздо более ранним принятием норм SN , а также с различием методик определения двух параметров.

Возвращаясь к физической связи между этими параметрами, рассмотрим те же данные эксперимента на рис. 4 в виде измеренной максимальной концентрации нелетучих частиц как функции измеренного числа дымности. На том же графике представлена аналогичная зависимость по линейной формуле (4). Экспериментальные данные достаточно хорошо согласуются с указанной зависимостью. Наиболее сильное отклонение наблюдается для двигателей Trent 1000 и PW1127, имеющих наибольший выброс нелетучих частиц. Отметим,

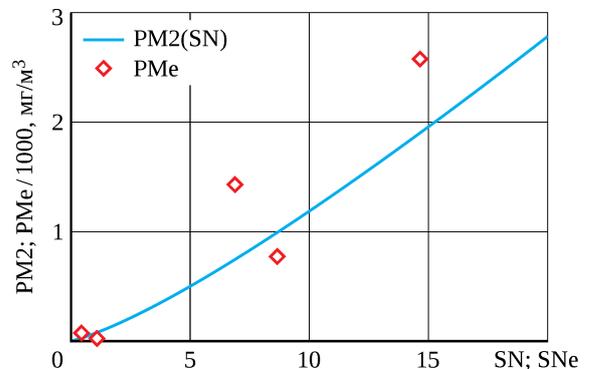


Рис. 4. Изменение максимальной концентрации нелетучих твердых частиц в зависимости от числа дымности при испытаниях двигателей и по зависимости (4)

что максимальная эмиссия нЛГЧ у этих двигателей наблюдается и по параметру LTO_{mass}/F_{00} (мг/кН), суммирующему выбросы за весь взлетно-посадочный цикл.

Таким образом, зависимость $PM2(SN)$, как и зависимость $PM1(SN)$ при $SN < 25$, может использоваться для оценки в первом приближении выброса нелетучих частиц по измерениям параметра SN при испытаниях авиационных ТРДД.

Ниже более подробно будет проанализирована база данных ИКАО с целью выявления параметров, в наибольшей степени влияющих на эмиссию нЛГЧ авиационными двигателями.

Краткий анализ экспериментальных данных о дымлении ТРДД

Характеристики дымления являются производной от ряда конструктивных параметров двигателя (степени повышения давления (π_k^*), уровня температуры и давления воздуха перед камерой сгорания, системы распыливания и организации горения и др.), влияющих на процесс горения топлива и процесс образования частиц. Объем экспериментальных данных о нЛГЧ в настоящее

Табл. 2. Число дымности двигателей CFM56 разной модификации

№	Двигатель	Камера сгорания	F_{00} , кН	m	π_k^*	SN (R = 100%)	SN (R = 85%)	SN (R = 30%)	SN (R = 7%)
c1	CFM56-5A1	–	111,2	6	26,6	15,8	14	4,4	2,3
c2	CFM56-5B9/2P	DAC	102,2	5,9	24	0,3	0,3	6,6	1,7
c3	CFM56-7B/27E	Tech Insertion	121,4	5,1	29	13,4	11,2	2,1	2,1

Табл. 3. Число дымности двигателей ПС-90, Trent 1000, GEEx

№	Двигатель	Камера сгорания	F_{00} , кН	m	π_k^*	SN (R = 100%)	SN (R = 85%)	SN (R = 30%)	SN (R = 7%)
c4	ПС-90	ПС	154	4,48	30,8	6,7	7,8	5,6	0,23
c5	Trent 1000	Phase5 Tiled	310	9	41	3,5	4,2	3,6	0,5
c6	GEEx	TAPS	255	9,4	35,2	0	0	5,4	0,05

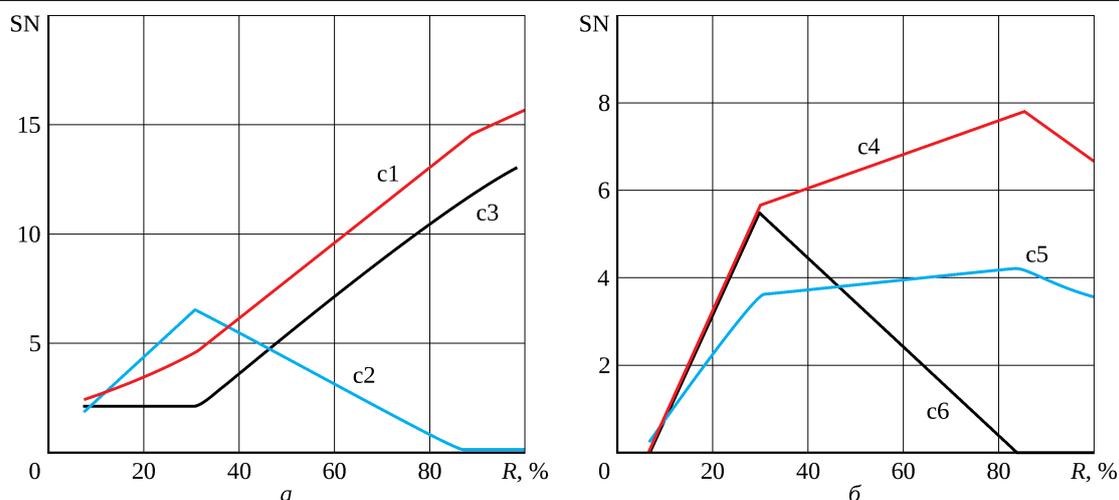


Рис. 5. Сравнение числа дымности по взлетно-посадочному циклу для ряда двигателей

время мал, поэтому здесь будет рассмотрен параметр SN на основе данных базы ИКАО последней версии [3] по дозвуковому взлетно-посадочному циклу для ряда ТРДД.

В табл. 2 представлены данные о двигателях CFM56 с разными модификациями камеры сгорания: как старыми (c1, c3), так и относительно новой (схема DAC, c2) – по режимам ВПЦ (R – тяга в процентах от F_{00}). При этом все двигатели имеют близкие параметры (F_{00} , π_k^* и степень двухконтурности (m)). Данные о больших ТРДД ПС-90, Trent 1000 и GEEx представлены для сравнения в табл. 3. Эти двигатели относительно новые и имеют (особенно последние два) повышенные параметры цикла. Из анализа представленных данных следует:

- почти одинаковые параметры двигателей не обеспечивают одинаковых значений SN (рис. 5,а);
- относительно новые камеры сгорания двигателей ПС-90, Trent 1000, GEEx имеют уровень дымления в два раза ниже, чем более ранние модификации камер сгорания двигателей CFM56;
- старые камеры сгорания с богато-бедной схемой сжигания топлива (RQL) (c1, c3) имеют максимум дымления на взлетном режиме;

– модернизированные камеры сгорания типа RQL (с4, с5), с увеличенным расходом воздуха через фронт, двигателей Trent 1000 и ПС-90 с увеличенными π_k^* и m имеют максимум дымления на режиме 85% взлетной тяги;

– у камеры сгорания двигателя GEnx последней модификации (с6), с фронтальными модулями TAPS и отсутствием ступенчатого подвода воздуха в жаровую трубу, отсутствует дымление на взлете и при наборе высоты и есть небольшое дымление на режиме захода на посадку ($R = 30\%$), которое можно отнести к одновременной работе пилотного и основного контуров фронтального модуля TAPS.

Процесс генерации частиц дыма двигателем связан как с образованием частиц в богатых топливом зонах горения, так и с последующим их догоранием в обедненных зонах камеры сгорания и в тракте турбины, а также с разбавлением потока продуктов сгорания воздухом второго контура в смесителе. Представленные данные позволяют утверждать, что характеристики дымления (и, очевидно, выбросов нЛТЧ) в большей степени определяются конструкцией камеры сгорания и системой распыливания топлива и в меньшей степени – параметрами двигателя. Они слабо связаны с образованием недогоревших СО и НС, максимум образования которых, как известно, приходится на режимы малого газа.

О характерном размере нелетучих твердых частиц

Поставим вопрос: зависит ли состав частиц и их характерный размер от параметров двигателя или во всех двигателях, независимо от тяги, образуется стандартный по размерам набор частиц, различающийся только их суммарной массой? Как было сказано выше, в процессе испытаний измеряют концентрации и индексы эмиссии нЛТЧ не только на режиме максимального дымления, а на всех режимах ВПЦ. Зная абсолютные значения эмиссии частиц за ВПЦ (LTO_{mass} и LTO_{num} , табл. 4), можно оценить средний размер частиц за цикл. При этом в соответствии с нормами ИКАО будем считать нелетучие частицы сферическими, с плотностью $\rho = 1 \text{ г/см}^3 = 1 \cdot 10^{-9} \text{ мг/мкм}^3$.

Табл. 4. Абсолютные значения эмиссии нелетучих твердых частиц за взлетно-посадочный цикл для некоторых авиационных ТРДД

Двигатель	Камера сгорания	F_{00} , кН	LTO_{mass} , мг	LTO_{num} , частиц	PM_{max} , мг/м ³	SN_{max}
CFM56-7B20E	Tech Insertion	91,6	3691	$6,21 \cdot 10^{16}$	707	8,66
LEAP-1B21	TAPS II	111,3	150	$7,96 \cdot 10^{15}$	66	1,16
PW1127G-JM	Talon X	120,4	6464	$2,17 \cdot 10^{17}$	1442	6,79
GEnx-1B64/P2	TAPS	298	1701	$1,6 \cdot 10^{16}$	125	0,58
Trent 1000 (01P19RR113)	Phase5 Tiled	334,7	46 114	$4,1 \cdot 10^{17}$	2649	14,7

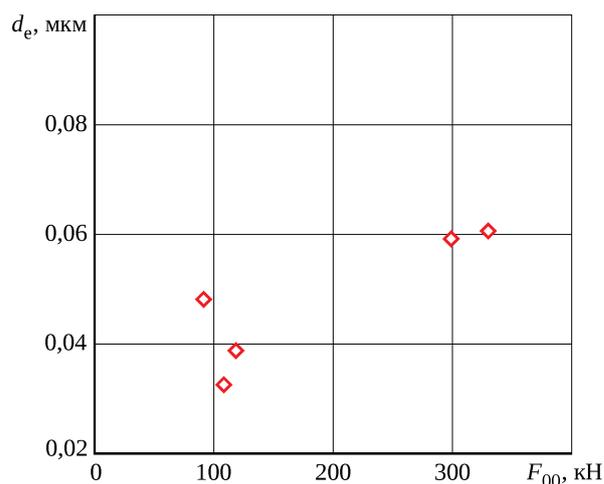


Рис. 6. Изменение диаметра нелетучих твердых частиц в зависимости от взлетной тяги

Для расчета используем уравнение материального баланса для нелетучих частиц:

$$LTO_{mass} = LTO_{num} \pi d_e^3 / 6\rho, \quad (6)$$

которое и определит среднемассовый экспериментальный размер частиц (d_e) за ВПЦ. Результаты вычисления представлены на рис. 6 в виде функции взлетной тяги. Размеры частиц достаточно малы и близки между собой: 0,035...0,06 мкм. Тем не менее нужно отметить некоторое увеличение частиц при росте взлетной тяги.

Таким образом, диаметр частиц является обобщающим параметром для выбранного типа двигателя, поэтому может рассматриваться как комплексный параметр наряду с другими.

О кривой распределения нелетучих твердых частиц по размерам

Выше было показано, что результаты измерения эмиссии нЛТЧ позволяют определить характерный размер для совокупности частиц за ВПЦ по формуле (6). По экспериментальным данным ИКАО [3] о пяти современных двигателях определен диапазон этой величины: $d_e = 0,035 \dots 0,06$ мкм.

Совокупность рассматриваемых частиц в каждом конкретном случае имеет некоторое распределение по

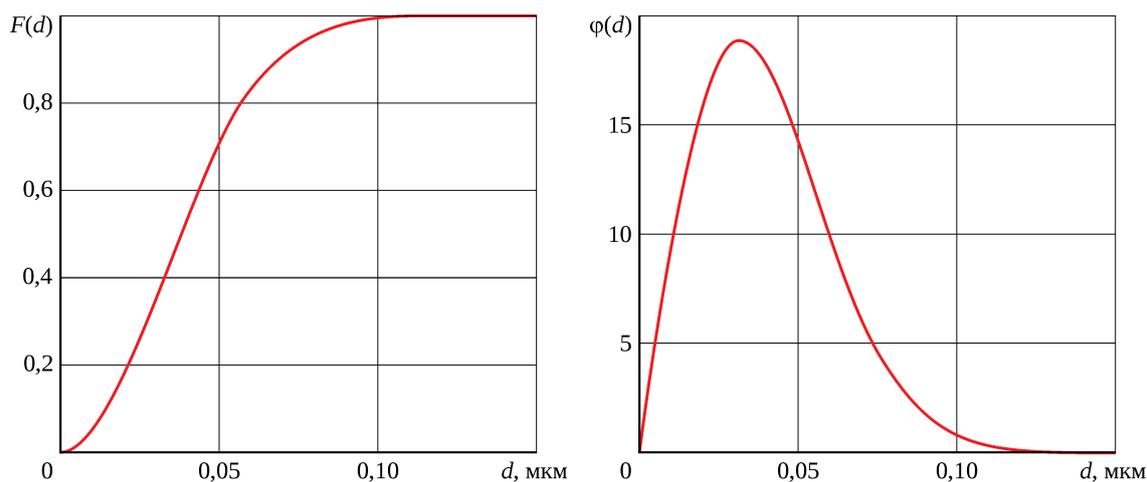


Рис. 7. Кривые распределения нелетучих твердых частиц по размерам при среднемассовом размере частиц по ВПЦ $d_e = 0,05$ мкм

размерам. Воспользуемся широко известным суммарным распределением Розина – Рамллера [5]¹⁾:

$$G(d) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{d}{x}\right)^n\right], \quad (7)$$

где d – размер частиц; $n > 2$ – параметр распределения; x – размерный параметр распределения.

Этому распределению соответствует кривая частоты (вероятности) нахождения частиц размером d , определяемая производной от $G(d)$:

$$\varphi(d) = \frac{d}{dd} G(d). \quad (8)$$

Известно, что частотная кривая имеет максимум, который соответствует d_{mod} . Величина d_{mod} находится из условия равенства нулю первой производной от $\varphi(d)$. Интеграл от $\varphi(d)$ во всем диапазоне размеров частиц равен единице.

В этом случае функция распределения частиц по размерам, выраженная через d_{mod} , имеет вид

$$G(d) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{d}{d_{\text{mod}} / [(n-1)/n]^{1/n}}\right)^n\right]. \quad (9)$$

Представляется, что размер нелетучих частиц d_e , определенный по формуле (6), не соответствует значению d_{mod} , которое соответствует максимальному числу частиц данного размера в совокупности. При этом d_{mod} описывается параметрами распределения x и n :

$$d_{\text{mod}} = x[(n-1)/n]^{1/n}. \quad (10)$$

Данные эксперимента, например ЛТО_{mass}, по-существу, производят усреднение по массе (или объему) всей совокупности частиц. Этому среднемассовому размеру соответствует размер d_{30} :

$$d_{30} = \frac{\left(\int_0^{d_{\text{max}}} \varphi(d) d^3 dd\right)^{1/3}}{\int_0^{d_{\text{max}}} \varphi(d) dd}. \quad (11)$$

В интегралах при вычислениях вместо бесконечности используется $d_{\text{max}} \approx 4d_{\text{mod}}$.

Если в распоряжении исследователя имеется d_{30} , выше обозначенное как d_e , то приведенные соотношения (за счет установления соответствия между d_{30} и d_{mod}) легко трансформируются, так что d_{30} становится параметром кривой суммарного и частотного распределений. Параметр n , как следует из практики исследования распыливания жидкости, можно считать равным двум. В таком случае распределение частиц по размерам с параметром d_{30} имеет вид

$$F(d) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{d}{0,911d_{30}}\right)^n\right]. \quad (12)$$

При этом кривые распределений $G(d)$ и $F(d)$, естественно, совпадают.

Если теперь принять, что $d_{30} = d_e = 0,05$ мкм, на основании обработки экспериментальных результатов, проведенной выше, то суммарное и частотное распределения для данного d_e будут иметь вид, представленный на рис. 7. Отметим, что d_{30} в этом случае больше $d_{\text{mod}} = 0,032$ мкм, определяемого аналитически как точка максимума частотной кривой.

¹⁾ В стандарте ИКАО [1], в добавлении 8, при оценке поправок на потери нЛТЧ в системе отбора, зависящих от размера частиц, приведена методика, использующая двухпараметрическое логарифмически нормальное распределение, по виду близкое к распределению (7).

Проверка показывает, что интеграл

$$\int_0^{d_{\max}} \varphi(d) dd = 1.$$

Очевидно, что распределение такого типа может использоваться при дальнейшем прогнозировании и моделировании совокупности нелетучих частиц.

Заключение

В статье освещены лишь некоторые проблемы изучения нового нормируемого компонента авиационной эмиссии – нелетучих твердых частиц. Проведен анализ экспериментальных данных ИКАО об эмиссии дыма ТРДД. Показано, что она в большей степени зависит от конструкции камеры сгорания, нежели от параметров двигателя. На основе анализа данных определен средний размер частиц для совокупности нЛТЧ в выбросах по взлетно-посадочному циклу для современных авиационных двигателей и предложена двухпараметрическая кривая распределения частиц по размерам, учитывающая осреднение по массе.

Литература / References

1. Охрана окружающей среды : прил. 16 к Конвенции о международной гражданской авиации. Т. 2. Эмиссия авиационных двигателей / Международная организация гражданской авиации. Изд. 4-е. Монреаль : ИКАО, 2017. 190 с. Разд. паг. (Международные стандарты и рекомендуемая практика).
Environmental protection : annex 16 to the Convention on International Civil Aviation. Vol. 2. Aircraft engine emissions / International Civil Aviation Organization. 4th ed. Montreal, ICAO, 2017. 170 p. Pag. var. (International Standards and Recommended Practices).
2. Committee on Aviation Environmental Protection. Eleventh Meeting : Montréal, 4–15 February 2019 : report / ICAO. Doc 10126, CAEP/11.
3. ICAO aircraft engine emissions databank. Iss. 29 (6 February 2023) // EASA Pro: site / EASA. Section “Domains”. URL: <https://www.easa.europa.eu/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank>. File name: edb-emissions-databank_v29 (web).xlsx (accessed: 08.06.2023).
4. Авиационные правила. Ч. 34. Охрана окружающей среды. Эмиссия загрязняющих веществ авиационными двигателями. Нормы и испытания / Межгос. авиац. комитет. 2003. 99 с. Разд. паг.
Aviatsionnyye pravila [Aviation rules]. Part 34. Okhrana okruzhaiushchei sredy. Emissiia zagriazniayushchikh veshchestv aviatsionnymi dvigateliami. Normy i ispytaniia [Environmental protection. Exhaust emission requirements for aircraft engines. Rules and tests]. The Interstate Aviation Committee. 2003. 99 p. Separate pagination.
5. Распыливание жидкостей. 2-е изд., доп. и перераб. / Ю.Ф. Дитякин., Л.А. Клячко, Б.В. Новиков, В.И. Ягодкин. М.: Машиностроение, 1977. 207 с.
Dityakin Yu.F., Klyachko L.A., Novikov B.V., Yagodkin V.I. Raspylivanie zhidkостей [Atomization of liquids]. 2nd ed., expanded and revised. Moscow: Mashinostroenie [Mechanical Engineering], 1977. 207 p.

Материалы получены редакцией 29.05.2023