

УДК 621.45.00.112.03.54-225

РАСЧЕТ ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ АВИАДВИГАТЕЛЯМИ В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ АВИАТРАНСПОРТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

О.А. КАРТЫШЕВ, В.В. МЕДВЕДЕВ

Статья представлена доктором технических наук, профессором Пивоваровым В.А.

Предложена методика расчета выбросов загрязняющих веществ авиадвигателями воздушных судов. Методика имеет два уровня сложности расчетов. В отличие от первого уровня, базирующегося на использовании стандартного взлетно-посадочного цикла ИКАО, второй, более сложный уровень, дает возможность существенно повысить точность расчетных оценок и проводить эти оценки для любого этапа полета воздушного судна.

Введение

Известно, что деятельность гражданской авиации оказывает неблагоприятное воздействие на окружающую среду. К основным факторам такого воздействия обычно относят авиационный шум, а также выбросы загрязняющих веществ (ЗВ). Загрязнение атмосферы вблизи крупных аэропортов и на высотах крейсерского полета воздушных судов (ВС) в настоящее время рассматривается не только как актуальная локальная проблема, но и как глобальная проблема, связанная с изменением климата и разрушением озонового слоя Земли. Подписание Россией «Киотского Протокола» является еще одним подтверждением важности этой проблемы.

Используемая в настоящее время отечественная «Методика расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферу двигателями основных типов воздушных судов гражданской авиации» была разработана в конце 1980-х годов. На сегодняшний день она уже не соответствует современным условиям функционирования авиационной транспортной системы, требованиям основных законодательных актов в природоохранной сфере.

К числу основных задач определения выбросов ЗВ авиационными двигателями можно отнести следующие:

- расчет суммарных выбросов ЗВ двигателями ВС отдельных видов, например, нормируемых стандартами ИКАО или АП-34 (СО, СН, NO_x, SN) при эксплуатации ВС в приземном слое с использованием стандартного или реального взлетно-посадочного цикла (ВПЦ) для конкретных аэропортов;
- определение выбросов ЗВ маршевыми газотурбинными двигателями ВС на высотах крейсерского полета ВС различных типов;
- оценка объемов выбросов парниковых газов (СО₂, СН₄ и др.);
- определение выбросов ЗВ, определяющих разрушение озонового слоя;
- расчет и сравнительная оценка выбросов ЗВ двигателями ВС при эксплуатации смешанного парка ВС в различных аэропортах, осуществляющих внутренние или международные перевозки с целью обмена квотами на вредные выбросы.

1. Основные требования к методике

Методика должна обеспечивать:

- возможно большую универсальность, объективность и точность расчетных оценок выбросов ЗВ двигателями ВС;

- высокую степень гармонизации с действующими и перспективными методами оценок и нормами ИКАО по эмиссии, а также другими существующими методиками;
- ясность алгоритма, простоту и удобство использования программного продукта персоналом авиакомпаний, аэропортов и других пользователей;
- возможность объективной проверки природоохранными и другими заинтересованными организациями результатов расчета выбросов ЗВ.

Методика должна быть использована и при решении природоохранных задач по оценке валовых выбросов ЗВ в районе аэропортов и в верхних слоях атмосферы для определения размеров платы за загрязнение атмосферного воздуха. При этом необходимо иметь в виду, что за прошедшее десятилетие перечень учитываемых ЗВ оказался существенно расширен по сравнению с перечнем ИКАО.

2. Нормативная база и область применения методики

Методика разработана в соответствии законодательством Российской Федерации [1-3] на базе отечественных методик [4-6], гармонизирована с международными методами расчета [7-10] и призвана заменить действующую «Методику...» [5].

Рассматриваются две зоны влияния эмиссии двигателей ВС на атмосферу – в районе аэропорта и при полете по маршруту. Распределение на зоны влияния вызвано разницей последствий влияния эмиссии ЗВ в отмеченных зонах. Соответственно результаты расчета количества выбросов ЗВ необходимо приводить раздельно для каждой из отмеченных зон.

Методика распространяется на маршевые газотурбинные двигатели тягой больше 26,7 кН, установленные на воздушных судах гражданской авиации, что соответствует национальным [6] и международным требованиям [11]. Эксплуатационные характеристики двигателей представлены в соответствующих технических описаниях, руководствах по эксплуатации и формулярах, а также данных банка ИКАО.

3. Расчет выбросов загрязняющих веществ

Исходя из типовых технических требований ИКАО к авиационному топливу, после преобразования известных уравнений химических реакций можно определить количество конкретных продуктов сгорания в зависимости от массы израсходованного топлива:

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 \text{ (кг)} &= 3,12 M_T \text{ (кг)}; \\ \text{H}_2\text{O (кг)} &= 1,35 M_T \text{ (кг)}; \\ \text{SO}_2 \text{ (кг)} &= 0,005 M_T \text{ (кг)}. \end{aligned}$$

Приведенные оценки являются максимальными, т.к. соответствуют полному сгоранию топлива. Их погрешность при существующих значениях полноты сгорания топлива не превосходит 2%. Отметим, что по данным доклада CAEP/5-IP/22, 2001 [12] для оценки двуокси углерода CO_2 удельный показатель равен 3,15; для оксидов серы SO_x - 0,0009 (при содержании серы в объеме топлива величиной 0,05%) и водяных паров H_2O - 1,23, т.е. величины близкие к полученным.

Поскольку метан – лишь один из компонентов несгоревших углеводородов, то для его оценки по типу оценки CO_2 , H_2O , SO_2 необходимо определить долю несгоревших углеводородов в массе тех вредных выбросов, которые являются продуктами неполного сгорания топлива.

Как известно, продукты неполного сгорания топлива – это окиси углерода (CO), несгоревшие углеводороды (CH) и твердые частицы (сажа). Обработка данных по вредным выбросам 43 отечественных и зарубежных двигателей различных классов тяг показала, что в среднем коли-

чество несгоревших углеводородов в 2,58 раза меньше, чем количество окиси углерода. Исходя из этого, и с учетом того, что метан (CH_4) по данным работы [13] составляет не более 10% общей массы выброса углеводородов CH за цикл ИКАО, были получены следующие соотношения:

$$\begin{aligned}\text{CH} \text{ (кг)} &\approx 0,28 (1-\eta_r) M_T \text{ (кг)}; \\ \text{CH}_4 \text{ (кг)} &\approx 0,028(1-\eta_r) M_T \text{ (кг)}; \\ \text{CO} \text{ (кг)} &\approx 0,72 (1-\eta_r) M_T \text{ (кг)}.\end{aligned}$$

В последних трех выражениях η_r – коэффициент полноты сгорания топлива, значения которого берутся из характеристик двигателя. Подчеркнем, что эти выражения являются приближенными, и ими следует пользоваться в случаях, когда эмиссионные характеристики конкретного двигателя по каким-либо причинам не известны. Отметим также, что по данным работы [14] на режимах крейсерского полета доля выбросов метана CH_4 в несгоревших углеводородах очень мала и поэтому его выбросы можно не учитывать.

Рассмотрим последовательность выполнения расчетов при использовании простого и детального метода по определению количества выбросов загрязняющих веществ маршевого газотурбинного двигателя в наземных и полетных условиях эксплуатации.

3.1. Простой метод расчета

Простой метод расчета может применяться в условиях отсутствия данных средств объективного контроля полетной информации. Он основан на использовании стандартного ВПЦ ИКАО.

Расчет массы выбросов CH_4 выполняется из соотношения $M(\text{CH}_4)=0,1M(\text{CH})$, а SO_2 из условия $M(\text{SO}_2)=0,005M_T$, где M_T (кг) - суммарный расход топлива за ВПЦ.

Масса выбросов загрязняющих веществ CH , CO , NO_x на участке полета ВС от ВПЦ аэропорта вылета до ВПЦ посадки определяется из соотношения

$$M_{j \text{ кр}} = EI_{j \text{ кр}} M_{T \text{ кр}}, \text{ кг},$$

где $EI_{j \text{ кр}}$ – берется из банка данных ИКАО [15] для номинального режима работы двигателя, $M_{T \text{ кр}}$ - масса топлива, израсходованного в полете без учета этапов ВПЦ:

$$M_{T \text{ кр}} = nG_{T \text{ кр}} \tau_{\text{кр}}, \text{ кг},$$

где n – число двигателей на ВС, $G_{T \text{ кр}}$ – часовой расход топлива при работе двигателя на номинальном режиме, время полета по маршруту $\tau_{\text{кр}}$ на высоте более 915м:

$$\tau_{\text{кр}} = \tau_{\text{расч}} - \tau_{\text{ВПЦ}}, \text{ с},$$

где время ВПЦ $\tau_{\text{ВПЦ}}=2174\text{с}$, $\tau_{\text{расч}}$ – продолжительность полета по расписанию.

Если данные по рассматриваемому двигателю отсутствуют, то допустимо использование данных авиадвигателей со сходными параметрами рабочего процесса (степень повышения давления и температура газов на выходе из камеры сгорания).

Масса выбросов по каждому виду загрязняющего вещества от данного типа ВС определяется следующим образом. Полученные значения массы загрязняющих веществ по этапам полета перемножаются на количество двигателей, установленных на данном типе ВС.

В процессе определения массы выбросов загрязняющих веществ при опробовании двигателей отечественного производства можно использовать эмиссионные характеристики, представленные на рис. 1.

Влияние изменения наружных условий на величину G_T может быть учтено с помощью известных формул приведения.

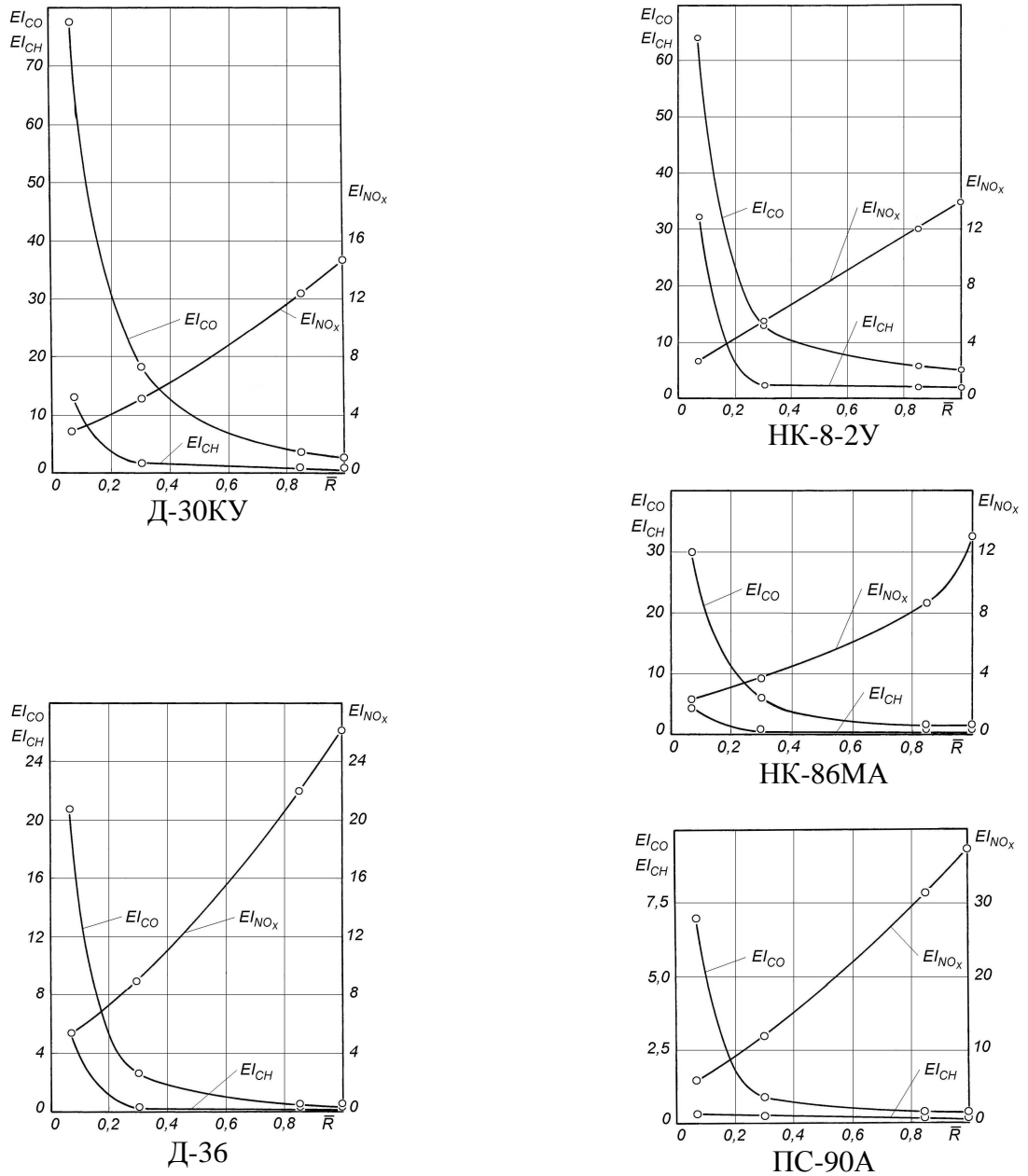


Рис. 1. Эмиссионные характеристики некоторых отечественных авиадвигателей

3.2. Детальный метод расчета

Детальный метод расчета ориентирован на получение наиболее достоверных результатов по выбросам ЗВ на всех этапах эксплуатации двигателей ВС. Он предусматривает использование данных средств объективного контроля полета.

Для i -го этапа фактического ВПЦ с использованием дроссельных характеристик двигателя и формул приведения к САУ рассчитывается расход топлива:

$$G_{\tau i} = \frac{C_{удi} R_i}{3600}, \text{ кг/с};$$

$$\text{где } C_{удi} = C_{удпрi} \sqrt{\frac{T}{288}}; \quad R_i = R_{прi} \frac{p}{101325}.$$

Далее определяется масса топлива, израсходованного за ВПЦ:

$$M_{\text{тВПЦ}} = n \sum_i G_{\text{т}i} \tau_i, \text{ кг},$$

где τ_i – продолжительность i -го этапа ВПЦ (с), n – число двигателей на ВС.

Другим, более точным источником данных по $G_{\text{т}j}$ и τ_i являются данные расшифровки средств объективного контроля полетной информации.

Рассчитывается масса выбросов загрязняющих веществ за ВПЦ:

$$M_{\text{жВПЦ}} = n \sum_i EI_j G_{\text{т}i} \tau_i, \text{ кг}.$$

Здесь EI_j – берется из технических или сертификационных данных двигателя (банка данных ИКАО [15]) и пересчитывается на конкретные атмосферные условия.

Масса выбросов твердых частиц одним двигателем $M_{\text{тч}}$ определяется пропорционально времени реального ВПЦ к стандартному ($\tau_{\text{впц}}=2174\text{с}$). Если данные по рассматриваемому двигателю отсутствуют, то допустимо использование данных авиадвигателей со сходными параметрами рабочего процесса.

Расчет $M(\text{CH}_4)$ и $M(\text{SO}_2)$ производится аналогично простой методике, но здесь величина $M_{\text{т}j}$ – расход топлива за реальный ВПЦ.

Масса выбросов по каждому виду загрязняющего вещества от данного типа ВС определяется как сумма значений масс загрязняющих веществ по каждому двигателю за ВПЦ по всем двигателям, установленным на конкретном ВС.

При опробовании масса выбросов загрязняющих веществ одного двигателя определяется следующим образом:

$$M_{\text{хоп}} = \sum EI_j G_{\text{т}} \tau_i,$$

где τ_i – фактическое время работы на i -ом режиме, сек.

Данные по $EI_{j \text{кр}}$ и секундному расходу топлива $G_{\text{т}}$ для конкретного режима работы двигателя выбираются из таблицы данных ИКАО [15] (из близких по значению режимов работы двигателя). Более точным источником данных по $G_{\text{т}}$ и τ_i являются данные расшифровки средств объективного контроля.

В процессе расчета $M(\text{CH}_4)$ и $M(\text{SO}_2)$ величина $M_{\text{т}}$ – расход топлива за фактическое время работы на i -ом режиме.

При определении массы выбросов ЗВ в полете на высоте более 915м вначале находится время данного участка полета:

$$\tau_{\text{кр}} = \tau_{\text{расч}} - \tau_{\text{впц}}, \text{ с},$$

где $\Phi_{\text{впц}} = \sum_i \Phi_i$ – суммарная продолжительность всех этапов ВПЦ, $\tau_{\text{расч}}$ – продолжительность полета по расписанию.

Для крейсерского режима работы двигателя с использованием его высотно-скоростных характеристик определяется расход топлива:

$$G_{\text{ткр}} = \frac{C_{\text{удкр}} R_{\text{кр}}}{3600}, \text{ кг/с}.$$

Рассчитывается масса топлива, израсходованного в полете без учета этапов ВПЦ:

$$M_{\text{ткр}} = n G_{\text{ткр}} \tau_{\text{кр}}, \text{ кг}.$$

Другим, более точным источником данных по $G_{\text{ткр}}$ и $\tau_{\text{кр}}$ являются данные расшифровки средств объективного контроля полетной информации.

При проведении оценки массы выбросов загрязняющих веществ на основном участке полета необходимо отметить результаты и выводы [16], согласно которым массовые доли выбросов ЗВ составляют:

- окислы азота NO_x 84,0%;
- окись углерода CO 11,8%;
- углеводороды HC 4,0 %;
- твердые частицы (сажа) 0,2%.

На основании этих данных в [16] предлагается учитывать только выбросы NO_x , значение индекса эмиссии которого на основном участке полета рассчитывается по формуле

$$(EI_{\text{NO}_x})_{\text{H}} = (EI_{\text{NO}_x})_0 \left(\frac{P_{\text{кН}}}{P_{\text{к0}}} \right)^{0,4} \text{EXP}(19(h_0 - h_{\text{H}})),$$

где $h_0=0,00634$ кг воды/кг сухого воздуха. Индекс «Н» соответствует параметрам на высоте Н полета.

Тогда

$$M_{\text{NO}_x \text{ кр}} = EI_{\text{NO}_x \text{ кр}} M_{\text{т кр}}, \text{ кг.}$$

Расчет массы выбросов SO_2 выполняется из условия

$$M(\text{SO}_2) = 0,005 G_{\text{т кр}}$$

Более точно выбросы окиси серы оцениваются по количеству израсходованного топлива и массовому содержанию серы в топливе по следующей формуле:

$$M(\text{SO}_x) = \sum_i M_{\text{топл } i} \bar{S}_i,$$

где $M(\text{SO}_x)$ – валовые выбросы оксидов серы, кг; $M_{\text{топл}}$ – количество израсходованного за полет топлива i -й марки; \bar{S}_i – относительное массовое содержание серы в топливе i -й марки (по паспорту).

Масса выбросов $M_{\text{кр}}$ по каждому виду загрязняющего вещества от данного типа ВС за полет по маршруту определяется путем суммирования значений масс загрязняющих веществ по всем двигателям, установленным на конкретном ВС.

4. Расчет выбросов ЗВ за полет

Данные обработки конкретных полетов, приведенные в табл. 1, наглядно показывают преимущества использования данных объективного контроля. В основном это преимущество обусловлено учетом фактического времени руления, так как время взлета, набора высоты до 915 метров, снижение и заход на посадку с высоты 915 метров достаточно точно усредняется ИКАО. Как видно из табл. 1, только в одном случае продолжительность реального ВПЦ превосходит продолжительность стандартного ВПЦ. В остальных случаях, особенно в осенние месяцы, продолжительность реального ВПЦ существенно ниже, чем стандартного.

В качестве примера выполнена оценка выбросов ЗВ с помощью детального метода по результатам полетов самолета Ил-96 (борт 96005) по маршруту Шереметьево – Симферополь - Шереметьево. При расчетах по детальному методу использована информация объективных средств контроля двух полетов по этому маршруту. Результаты расчетов показали, что использование в расчетах стандартного времени ВПЦ приводит к завышению величин выбросов ЗВ более чем на 20%. Это соответствует зарубежным расчетным оценкам [7...10] и свидетельствует в пользу более детальных расчетов.

Таблица 1

Сравнение фактического и нормируемого времени на выполнение ВПЦ

Дата	Рейс №	Тип ВС	Аэропорт взлета/посадки	Фактическое время за ВПЦ, мин	Нормируемое время ВПЦ ИКАО, мин.	Расхождение фактического и нормируемого времени, мин./%
20.10.03	742	Ту-154	Шереметьево	16,8		
			Иркутск	10,1	32,9	- 6,0 / 18
21.10.03			Шереметьево	14,2		
			Пулково	10,5	32,9	- 8,2 / 25
			Пулково	15,05		
			Шереметьево	14,6	32,9	- 3,25 / 10
21.10.03	521	Ил-86	Шереметьево	17,6		
			Дубай	11,6	32,9	- 2,7 / 8
11.07	199	Ил-96	Шереметьево	21,84		
			Симферополь	13,16	32,9	+ 2,1 / 6
			Симферополь	14,34		
			Шереметьево	11,50	32,9	- 7,06 / 21
12.07	199	Ил-96	Шереметьево	18,36		
			Симферополь	6,46	32,9	- 8,08 / 24
			Симферополь	20,02		
			Шереметьево	11,06	32,9	- 0,82./ 2

5. Заключение

Получаемые с помощью методики результаты расчетов могут использоваться при оценке и учете валовых выбросов ЗВ при наземных и полетных условиях эксплуатации ВС.

Контроль корректности расчетов может быть выполнен на любом отчетном этапе с помощью текущей технической документации авиапредприятия о количестве заправленного в самолет топлива, а также по финансовым документам о закупках топлива за отчетный период времени.

Методика может быть использована при решении природоохранных задач, по оценке валовых выбросов ЗВ в районе аэропортов гражданской авиации и в верхних слоях атмосферы, по оценке валовых выбросов ЗВ для определения соответствия установленным лимитам выбросов и определения размеров платы за загрязнение атмосферного воздуха.

Методика в целом гармонизирована с методами оценок вредных выбросов ИКАО и CORINAIR и, следовательно, может использоваться при определении квот на выброс ЗВ иностранными ВС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федеральный закон «Об охране окружающей среды» № 2060-1. М., 1992.
2. Федеральный закон «Об охране атмосферного воздуха» № 96-ФЗ. 1999, № 18.
3. Федеральный закон «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» № 52-ФЗ. Собр. законод. РФ, 1999, № 14.
4. Государственный стандарт СССР ГОСТ 17.2.2.04-86. «Охрана природы. Атмосфера. Двигатели газотурбинные самолетов гражданской авиации. Нормы и методы определения выбросов загрязняющих веществ». М. Изд. стандартов, 1986.
5. Министерство гражданской авиации, ГосНИИ ГА. «Методика расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферу двигателями основных типов воздушных судов гражданской авиации». М., 1991.
6. Авиационные Правила, часть 34 «Охрана окружающей среды. Нормы эмиссии для авиационных двигателей» (АП-34), 2001.

7. European Environment Agency, EMER/CORINAIR. Atmospheric Emission Inventory Guidebook, 2 nd edition, 1999.
8. Environmental benefits associated with global aviation emissions and potential reduction from CNS/ATM measures. Paper CAEP/5-IP/17, 2000.
9. Market – based measures report from WG5 to the fifth meeting of the Committee on Aviation Environmental Protection. Paper CAEP/5-IP/22, 2001.
10. ECAC. Methodology for emissions calculations, 2003.
11. Международные стандарты и рекомендуемая практика «Охрана окружающей среды». Приложение 16 к Конвенции о международной ГА, том 2, «Эмиссия авиационных двигателей», Монреаль, 2-е изд., 1993.
12. Market – based measures report from WG5 to the fifth meeting of the Committee on Aviation Environmental Protection. Paper CAEP/5-IP/22, 2001.
13. Mobile combustion: aircraft. IPCC Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories, 2000.
14. Olivier, J.G.J. (1991): Inventory of Aircraft Emissions: A Review of Recent Literature. National Institute of Public Health and Environmental Protection, Report no. 736 301 008, Bilthoven, the Netherlands.
15. ICAO ENGINE EXHAUST EMISSIONS DATA BANK. Документ ИКАО 9646-AN/943. Последние исправления 31.07.2002, Internet e-mail: icaohq@icao.int; Internet home page: <http://www.icao.int>.
16. Development of the technical basis for a New Emissions Parameter covering the whole AIRcraft operation: NEPAIR. CAEP/6-IP17. Final Technical Report. 2003. 68Pages.

QUANTITY DETERMINATION OF AVIATION ENGINES POLLUTANTS IN MODERN CONDITIONS OF AVIATION TRANSPORTATION

Kartyshev O.A., Medvedev V.V.

The calculation methods of aviation engines pollutants in proposed. The methods has two levels of complexity. The first levels is based on the ICAO LTO cycle using. The second (more complex) level permits to improve the precision of the results and to perform the calculations of the pollutants for any stage of the aircraft flight.

Сведения об авторах

Картышев Олег Алексеевич, 1949 г.р., окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения (1976), кандидат технических наук, начальник отдела ГосНИИ ГА, автор 48 научных работ, область научных интересов – воздействие авиационной техники на окружающую среду.

Медведев Владимир Владимирович, 1958 г.р., окончил Рижский Краснознаменный институт инженеров гражданской авиации (1981), кандидат технических наук, старший научный сотрудник ЦИАМ, доцент кафедры двигателей летательных аппаратов МГТУ ГА, автор более 40 научных работ, область научных интересов – авиационное двигателестроение.