

УДК 504.3.054:629.735.03

АНАЛИЗ МЕТОДИК РАСЧЕТА ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ДВИГАТЕЛЯМИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

О.А. КАРТЫШЕВ

Статья представлена доктором технических наук, профессором Скрипниченко С.Ю.

В статье приводится краткое описание и сравнительный анализ известных основных характеристик, расчетных соотношений и возможностей для расчета концентраций загрязняющих веществ от стационарных и передвижных источников аэропортового комплекса при авиатранспортных процессах. Показана применимость отечественной «Методики расчета концентраций загрязняющих веществ выбросов двигателей воздушных судов в районе аэропорта», которая полностью соответствует и реализует положения Doc 9889 ИКАО «Руководство по качеству воздуха в аэропортах».

Ключевые слова: методика расчета выбросов, концентрация загрязняющих веществ, воздушное судно, санитарно-защитная зона.

Решение задач оценки состояния загрязнения атмосферного воздуха в районе и на территории аэропорта по требованиям Роспотребнадзора [1] должно выполняться посредством установления расчетной санитарно-защитной зоны аэропорта и зоны санитарного разрыва от загрязняющих веществ (ЗВ) при полетах воздушных судов (ВС) с последующей корректировкой расчетных зон по результатам натурных измерений.

При этом, как для государственных органов, занятых в области оценки состояния окружающей среды, так и для авиапредприятий в настоящее время из-за отсутствия современных методов оценки существенно усложнилась задача обеспечения объективного и надежного контроля и учета выбросов ЗВ авиадвигателями ВС ввиду возросшего их разнообразия по сравнению с периодом авиации 15-20-летней давности. В связи с этим возникает необходимость в оценке применимости разработанных методических материалов по расчету величины вредных выбросов авиадвигателями [2].

К загрязняющим веществам, содержащимся в выхлопных газах авиадвигателей, относятся:

- оксиды углерода	CO;
- несгоревшие углеводороды	CH;
- оксиды азота	NO _x (NO, NO ₂);
- оксиды серы	SO _x .

Разработанная ГосНИИ ГА в 1991г. «Методика расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферу двигателями основных типов воздушных судов ГА» [3] предназначена для расчета валовых выбросов загрязняющих веществ от передвижных источников - авиадвигателей и вспомогательных силовых установок (ВСУ) при реализации этапов взлетно-посадочного цикла (ВПЦ) в районе аэропорта, а также при проведении опробования авиадвигателей в процессе их технического обслуживания, когда воздушное судно (ВС) является стационарным источником выбросов. Помимо этого методика содержит раздел по расчету выбросов ЗВ в полете.

Основу методики составляют аппроксимированные зависимости индексов эмиссии (EI) CO, CH, NO_x как функции параметра форсирования камеры сгорания Ω :

$$\Omega = \frac{G_{в\text{кк}}}{V_{\text{кк}} p_{\text{к}}^{1,8} \exp\left(\frac{T_{\text{к}}}{300}\right)}, \quad (1)$$

где $G_{в\text{кк}}$, $V_{\text{кк}}$ – соответственно расход воздуха через камеру сгорания и ее объем; $p_{\text{к}}$ и $T_{\text{к}}$ – давление и температура на входе в камеру сгорания.

В современных экономических условиях рассмотренная методика [3] не позволяет решать задачи мониторинга выбросов ЗВ авиадвигателями воздушных судов по следующим причинам.

1. Использование параметра форсирования камеры сгорания Ω в качестве аргумента для аппроксимации индексов эмиссии следует признать неудачным, т.к. в действительности индексы эмиссии зависят от большего числа параметров по сравнению с теми, что входят в выражение для Ω . В результате у камер сгорания с близкими значениями Ω индексы эмиссии могут существенно отличаться. Например, в настоящее время конструкция фронтального устройства камеры сгорания двигателя Д-30КУ существенно модернизирована и при том же значении параметра Ω имеет совершенно другие значения индексов эмиссии. Кроме этого, в зарубежных работах по исследованию рабочего процесса в камерах сгорания выражение для Ω отличается от того, что использовалось и используется в отечественных работах. Нужно также отметить, что для подавляющего большинства зарубежных двигателей определить величину Ω не представляется возможным, поскольку в их технических описаниях не приводятся величины, входящие в выражение (1).

2. Вызывает сомнения достоверность расчетов EI_{NO_x} в полетных условиях с помощью комплексного параметра K , в том числе в силу отсутствия строгой обоснованности изложенной последовательности расчета K .

3. В методике отсутствует механизм проверки достоверности производимых с ее помощью расчетов. В современных условиях этот фактор очень важен как для природоохранных органов, осуществляющих контрольные функции, так и для авиапредприятий, обеспечивающих функционирование воздушного транспорта и осуществляющих экологические платежи.

4. Методика не гармонизирована с действующими международными аналогами и не может быть с ними гармонизирована прежде всего в силу различного подхода к определению индексов эмиссии.

Учитывая необходимость разработки новой отечественной методики оценки величины выбросов ЗВ, которая была бы освобождена от указанных недостатков, автором, совместно со специалистами ЗАО «Центр экологической безопасности гражданской авиации», была разработана «Методика расчета выбросов загрязняющих веществ двигателями воздушных судов гражданской авиации», согласованная Министерством транспорта РФ [4] и внесенная в перечень методик расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, используемых в 2010 году при нормировании и определении величин выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух ОАО «НИИ Атмосфера».

Данная методика [4] гармонизирована с действующими международными аналогами, в том числе с Методикой Европейского агентства охраны окружающей среды ЕЕА ЕМЕП/CORINAIR [5] и устанавливает стандартные методы расчета выбросов ЗВ с использованием стандартного взлетно-посадочного цикла ИКАО (ВПЦ) и на крейсерских режимах полета, содержит простой и сложный методы расчета на основе учета израсходованного топлива и дальности полета. Методика [4] содержит примеры расчета и погрешность применяемых методов расчета.

Результаты выполненных расчетов на этапах ВПЦ [4] в дальнейшем могут использоваться для расчета концентраций ЗВ при наземной и летной эксплуатации ВС в составе проекта санитарно-защитных зон (СЗЗ) конкретного аэропорта как дополнительный

фон при расчете рассеивания ЗВ от наземных источников с дальнейшим установлением суммарной границы и зоны санитарного разрыва по фактору - загрязнение атмосферного воздуха.

В этой связи представляется целесообразным провести краткий анализ известных методик расчета концентраций ЗВ и возможности их применения для обозначенных целей. В настоящее время известны несколько расчетных методик [6-8] для различных транспортных и промышленных источников. Для расчета концентраций выбросов ЗВ от двигателей воздушных судов до сих пор используется разработанная ГосНИИ ГА в 1992 году «Методика контроля загрязнения атмосферного воздуха в окрестностях аэропорта» [6]. Эта методика имеет под собой более сложную структуру в отличие от методик [7;8], но одним из самых главных ее минусов является метод расчета с использованием фиктивного источника ЗВ и используются полуэмпирические формулы для определения положения фиктивного источника без какого-либо учета экранного эффекта ВПП и взаимодействия реактивных струй с атмосферным воздухом. Также имеются арифметические ошибки в формулах, что в итоге приводит к значительным завышениям уровней концентрации ЗВ, искажениям в их распределении, а следовательно и к неверному определению границ СЗЗ аэропорта.

Методика [7] EDMS (Emissions and Dispersion Modeling System), созданная CSSI Incorporated, представляет собой американский аналог «Методики расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий» (ОНД-86) [8], но, безусловно, более высокого уровня, поскольку предоставляется постоянная техническая поддержка в совокупности с обновлениями и обширными руководствами пользователя. Тем не менее, в основе программного продукта, несмотря на удобный интерфейс и возможность учета стационарных и движущихся источников ЗВ, лежит следующее частное решение уравнения турбулентной диффузии (2):

$$c(x, y, z, H) = \frac{M}{2\pi k_y k_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{k_y}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{k_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{k_z}\right)^2\right] \right\}. \quad (2)$$

Приведенное решение не учитывает время, а значит рассматривается стационарная задача и из рассмотрения упускаются эффекты, характерные для нестационарных процессов: затухание реактивной струи, всплытие облака ЗВ под действием разности давлений и рассеивание примесей ЗВ с течением времени.

Таким образом, методика EDMS более адекватна в приложении к движущимся источникам ЗВ, хотя и не учитывает всех факторов рассеивания примесей и процессов взаимодействия реактивной струи с окружающей атмосферой. Основное внимание разработчиками было уделено удобному взаимодействию пользователя с программой расчета.

Ввиду малой эффективности численных методов и недостаточности вычислительных ресурсов на момент разработки методика ОНД-86 [8] имеет определенную последовательность полуэмпирических формул. Научное обоснование полученных соотношений достаточно неясно и, по сути, остается скрытым. Дальнейший анализ в целях улучшения методики не представляется возможным. Но наиболее негативным в плане применимости к движущимся источникам ЗВ, в частности ВС, является тот факт, что методика ОНД-86 разрабатывалась для стационарных источников ЗВ и поэтому не учитывает множество факторов таких, как экранный эффект ВПП, торможение реактивной струи двигателей ВС внешней атмосферой, компоновку двигателей на ВС и характерные скорости истечения реактивной струи из сопла ВС.

К сожалению, применение этой методики рекомендовано Роспотребнадзором, что привело, например, для аэропортов Внуково и Шереметьево к неоправданному попаданию

значительной территории в СЗЗ, а значит к запрещению жилой застройки на этой территории и необходимости решения вопроса о переселении жителей этих территорий.

Вместе с тем, имеющийся ряд характерных специфических особенностей функционирования ВС в районе аэропорта не позволяет говорить о применимости ОНД-86 [8] для указанных целей, так как она предназначена для расчета приземных концентраций в двухметровом слое над поверхностью земли, а также вертикального распределения концентраций и она ориентирована, прежде всего, на расчет концентраций вредных веществ в атмосферном воздухе от промышленных источников загрязнения.

Во-первых, воздушное судно – перемещающийся по территории аэропорта источник загрязнения с переменной интенсивностью эмиссии вредных веществ и различной ориентацией направления эмиссии относительно ветра. Оно может быть и стационарным источником при технологических операциях опробования двигателей.

Во-вторых, на этапах взлета и посадки высота источника переменна.

В-третьих, по сравнению с типичными промышленными источниками параметры выхлопных газов авиадвигателей имеют гораздо более высокие значения. Например, для большинства современных авиадвигателей основные параметры выхлопной струи лежат в диапазонах:

- температура выхлопных газов $T_T=(300-600)^\circ\text{C}$;
- скорость истечения выхлопных газов $u_T=(100-600)$ м/с.

Высокий уровень температур выхлопных газов (в несколько раз превосходящий уровень температур выхлопных газов промышленных предприятий) по сравнению с температурой окружающего воздуха в условиях изобарического смешения обуславливает значительно больший градиент концентраций (плотностей). Уровень скоростей истечения выхлопных газов также в несколько раз превосходит уровень скоростей выхлопных газов промышленных предприятий. Кроме этого, направление скорости истечения из сопла авиадвигателя практически параллельно земле.

Из теории турбулентных струй известно, что соотношения скоростей и плотностей смешиваемых потоков оказывают доминирующее влияние на основные характеристики процесса смешения (выравнивания концентраций и других параметров потока). Между тем все выражения в методиках ОНД-86 получены при градиентах параметров потоков несопоставимых со случаем авиационных двигателей и, как следствие, не содержат отношений скоростей и плотностей смешиваемых потоков (помимо косвенного учета). Это обстоятельство, переменность высоты источника при взлете и посадке, а также то, что направление движения выхлопных газов авиадвигателей практически параллельно земле, делают некорректными попытки использовать методики ОНД-86 [8] для расчета концентраций вредных веществ в атмосферном воздухе от авиадвигателей воздушных судов.

Поэтому представляется необходимость разработки современной методики расчета концентраций вредных веществ в атмосферном воздухе от авиадвигателей ВС, которая позволяла бы адекватно учесть отмеченные особенности и тем самым (при совместном использовании с методиками ОНД-86) в целом обеспечить достаточно высокую достоверность расчета суммарной границы СЗЗ аэропорта с учетом эмиссии как от воздушных судов, автотранспорта, так и от других имеющихся на территории аэропорта промышленных источников.

Для реализации этой задачи ФГУП ГосНИИ ГА совместно с ЗАО «Центр экологической безопасности гражданской авиации» была разработана «Методика расчета концентраций загрязняющих веществ выбросов двигателей воздушных судов в районе аэропорта», согласованная Министерством транспорта РФ [9], проходящая в настоящее время наравне с «Методикой расчета выбросов загрязняющих веществ двигателями воздушных судов гражданской авиации» [4] процедуру верификации Комитета по защите окружающей среды от воздействия авиации (САЕР) ИКАО [10]. Необходимость прохождения достаточно

сложной и трудоемкой процедуры верификации методики [9] и реализующего ее программного обеспечения PEGAS [10] вызвано активным сопротивлением головного научно-методического центра Росгидромета ГГО им. А.И. Воейкова (разработчика ОНД-86). По результатам верификации указанные методики включаются в документ САЕР, представляющий обзор существующих методик и реализующих их программ, соответствующих требованиям САЕР.

При разработке методики [9] было учтено наиболее возможное количество параметров рассматриваемой задачи. Был рассмотрен весь цикл рассеивания ЗВ: от выброса посредством реактивной струи двигателя ВС до рассеивания образовавшегося облака ЗВ в атмосфере. Учтены не только режимы работы двигателей ВС с соответствующими различными по составу выбросами ЗВ, но и их компоновка (количество и расположение двигателей на ВС). Маршруты движения судов вместе со стоянками для прогрева двигателей обрабатываются и заносятся в расчет. Метеорологические условия: скорость и направление ветра, температура, атмосферное давление – являются параметрами каждого отдельного расчета, т.к. каждый проект по СЗЗ аэропорта индивидуален и имеет множество особенностей.

В основу методики [9] заложена модель распространения примеси ЗВ от точечного движущегося источника за счет атмосферной диффузии и ветра. В качестве модельного выбрано уравнение переноса с постоянными коэффициентами турбулентной диффузии [11]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_e \frac{\partial c}{\partial x} = k_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}; \quad (3)$$

где c - концентрация примеси; u_e - скорость ветра; k_x, k_y, k_z - коэффициенты турбулентной диффузии.

Примеси считаются химически неактивными (что соответствует действительности) и поэтому источниковые члены в исходном уравнении отсутствуют. Система координат выбрана таким образом, чтобы в левой части уравнения было меньше конвективных членов: на точность модели это не влияет, но позволяет сократить время численного счета.

Аналитическое частное решение для мгновенной концентрации модельного уравнения известно и имеет следующий вид [12]:

$$c(x, y, z, t) = \frac{M}{8(\pi t)^{3/2} \sqrt{k_x k_y k_z}} \exp\left(-\frac{(x-x_0-u_e t)^2}{4k_x t} - \frac{(y-y_0)^2}{4k_y t}\right) \times \left[\exp\left(-\frac{(z-z_0-H)^2}{4k_z t}\right) + \exp\left(-\frac{(z+z_0+H)^2}{4k_z t}\right) \right]. \quad (4)$$

Здесь приняты следующие обозначения: M – залповый выброс массы ЗВ за единицу времени работы двигателей ВС (эти данные определяются по известным индексам эмиссии ЗВ для рассматриваемого типа ВС и соответствующим сертификационным данным, установленным на ВС авиационных двигателей [4;13]); H – высота всплывания облака ЗВ; (x_0, y_0, z_0) - текущие координаты ВС относительно введенной системы отсчета. Последняя формула позволяет рассчитать поле концентраций для любой точки рассматриваемой области в любой момент времени для залпового источника.

Выбранная модель позволяет рассчитывать не только выбросы от ВС и других движущихся в пространстве источников ЗВ, но и рассчитывать концентрации ЗВ вблизи стационарных источников различной природы, что значительно расширяет применимость использования представляемого метода. Полученные значения концентраций могут использоваться при определении границ СЗЗ аэропорта.

Предложенный методический подход полностью соответствует и реализует положения Дос 9889 ИКАО «Руководство по качеству воздуха в аэропортах» [14], что планируется подтвердить в рамках процедуры верификации САЕР [10].

ЛИТЕРАТУРА

1. Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов. санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 с изменениями СанПиН 2.2.1./2.1.1.-2361-08.
2. Картышев О.А., Медведев В.В. Обзор известных методик расчета выбросов загрязняющих веществ двигателями воздушных судов // Авиационный экологический вестник. – 2007. – № 1.
3. Методика расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферу двигателями основных типов воздушных судов ГА. - М.: Министерство гражданской авиации: ГосНИИ ГА., 1991.
4. Методика расчета выбросов загрязняющих веществ двигателями воздушных судов гражданской авиации. – М.: ФГУП ГосНИИ ГА, ЗАО ЦЭБ ГА, 2007.
5. Методика Европейского агентства охраны окружающей среды ЕЕА ЕМЕП/CORINAIR (по данным Руководства по инвентаризации источников эмиссии от декабря 2001 г.)
6. Методика контроля загрязнения атмосферного воздуха в окрестностях аэропорта.. - М.: Министерство транспорта России: ГосНИИ ГА, 1992. - 58 с.
7. Isaacson, D. R., Robinson III, J. E., August 2001, "A Knowledge-Based Conflict Resolution Algorithm for Terminal Area Air Traffic Control Advisory Generation," AIAA 2001-4116, Guidance, Navigation, and Control Conference, Montreal, Canada.
8. ГГО им. А.И. Воейкова Госкомгидромета «ОНД-86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий». -Л.: Гидрометеиздат, 1987.
9. Методика расчета концентраций загрязняющих веществ от выбросов двигателей воздушных судов в районе аэропорта.– М.: ФГУП ГосНИИ ГА: ЗАО ЦЭБ ГА, 2008.
10. Рабочий документ САЕР/8-IP/48 от 21.1.2010 «Status report on model evaluations in Russian Federation».
11. Кофи С.Дж. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей / под ред Ф.Т.М. Ньистадта и Х. Ван Допа. - Л.: Гидрометеиздат, 1985.
12. Физика аэродисперсных систем. – Киев: Высшая школа, 1976. – Вып. 13.
13. ICAO Aircraft Engine Emissions DataBank. Issue 13 implemented on website, 1.10.2004.
14. Дос 9889 ИКАО, Руководство по качеству воздуха в аэропортах, 2007 (проект).

ANALYSIS OF AIRCRAFT ENGINES' EMISSION CALCULATION METHODOLOGIES

Kartyshev O.A.

The article gives a brief description and a comparative analysis of the known basic characteristics, settlement of relations and possibilities for calculation of pollutant concentrations from stationary and mobile sources in the airport complex. Shown the applicability of the domestic "Procedure of calculation the pollutants concentration from the aircraft engine emissions in the airport area", which is fully consistent with and implements provisions of ICAO Doc 9889 Airport air quality guidance manual.

Key words: methodology of emission calculation, concentration of pollutants, aircraft, sanitary-protective zone.

Сведения об авторе

Картышев Олег Алексеевич, 1949 г.р., окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения (1976), кандидат технических наук, директор Авиационного экологического центра ФГУП ГосНИИ ГА, автор более 50 научных работ, область научных интересов – авиационная акустика, экология воздушного транспорта, история гражданской авиации.