

УДК 504.6

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ МЕТОДИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПО РАСЧЕТУ ВЫБРОСОВ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ДВИГАТЕЛЯМИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

О.А. КАРТЫШЕВ, В.В. МЕДВЕДЕВ

Статья представлена доктором технических наук, профессором Умушкиным Б.П.

В статье изложен аналитический обзор существующих методов расчета выбросов загрязняющих веществ авиадвигателями воздушных судов. Приведена краткая характеристика каждой рассмотренной методики, оценена адекватность ее применимости в современных экономических условиях авиатранспортного производства. Обоснована необходимость разработки нового методического обеспечения для расчета валовых выбросов загрязняющих веществ и их концентраций в районе аэропорта.

Введение

Современные экономические условия авиатранспортного производства в России и на всей территории бывшего СССР принципиально отличаются от экономических условий функционирования авиации 15-20-летней давности. В контексте происходящих изменений как для государственных органов, занятых в области экологического мониторинга окружающей среды, так и для предприятий, занятых в сфере авиатранспортных перевозок, существенно усложнилась задача обеспечения объективного и надежного контроля и учета выбросов загрязняющих веществ (ЗВ) авиадвигателями воздушных судов (ВС) ввиду возросшего их разнообразия по сравнению с периодом до 1991г.

Между тем в России до сих пор используется методика [1] расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферу двигателями основных типов воздушных судов ГА и методика [2] расчета концентраций ЗВ в районе аэропорта.

В связи с этим возникает необходимость в оценке применимости разработанных ранее методических материалов в области воздействия воздушных судов на окружающую среду, в том числе и по оценке величины вредных выбросов авиадвигателями ВС.

1. Оценка применимости «Методики расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферу двигателями основных типов воздушных судов ГА»

Выпущенная в 1991г. «Методика...» [1] предназначена для расчета валовых выбросов загрязняющих веществ (ЗВ) от авиадвигателей и вспомогательных силовых установок (ВСУ), имеющих место при реализации этапов взлетно-посадочного цикла (ВПЦ) в районе аэропорта, а также при опробовании авиадвигателей в процессе технического обслуживания. Помимо этого методика содержит раздел по расчету выбросов ЗВ в полете. В перечень загрязняющих веществ входят:

окись углерода	CO;
несгоревшие углеводороды	CH;
окислы азота	NO _x ;
окислы серы	SO _x .

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

$$\Omega = \frac{G_{\text{a}} \hat{e} \hat{N}}{V_{\hat{e} \hat{N}} p_{\hat{e}}^{1,8} \exp\left(\frac{T_{\hat{e}}}{300}\right)}, \quad (1.1)$$

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

Значение индекса эмиссии окислов серы определяется как

$$EI_{\text{SOx}} = 20S,$$

где величина общего содержания серы S в топливе определяется по паспортным данным топлива.

В методике аппроксимированные зависимости индексов эмиссии от Ω приведены только для отечественных авиадвигателей, а именно: НК-8-2У, НК-86, Д-30, Д-30КУ, Д-30-КП, Д-30КУ-154, Д-36, ПС-90А, АИ-25, АИ-24, АИ-24Т, АИ-24ВТ. Для зарубежных авиадвигателей таких зависимостей нет.

Методика позволяет рассчитать массу вредных выбросов как для стандартного ВПЦ, так и для среднестатистического в окрестностях данного аэропорта. В последнем случае за время наработки двигателя в окрестностях конкретного аэропорта берется его среднестатистическое значение.

Масса вредных выбросов каждого компонента ЗВ за ВПЦ определяется как сумма произведений соответствующих индексов эмиссии на величину расхода топлива и время наработки на конкретном режиме с учетом количества двигателей на ВС, а также массы топлива, израсходованного ВСУ. При расчете массы вредных выбросов за отчетный период используются данные о количестве взлетов-посадок по каждому типу ВС.

При определении величины вредных выбросов в полете для расчета EI_{CO} и EI_{CH} используются те же зависимости, что и для земных условий, но с учетом соответствующих изменений температуры и давления для полетных условий. Для определения EI_{NOx} используются другие аппроксимированные зависимости вида

$$EI_{\text{NOx}} = aK^b,$$

где a и b – числа, соответствующие каждому типу двигателя; K – комплексный параметр, который рассчитывается в следующей последовательности:

$$K = 2,64 I_0 W \tau;$$

$$W = 8,4 \times 10^{-4} (0,102 p_{\text{к}})^{1/3} 10^{15,4 \left(\frac{\Delta T_s}{T_s}\right)};$$

$$\tau = 355,4 \frac{p_{\text{к}} V_{\text{к}}}{T_{\text{к}} G_{\text{в}}};$$

$$\Delta T_s = 0,616 T_{\text{к}} - \frac{18 + 0,306 T_{\text{к}}}{\left(\frac{p_{\text{к}}}{1,033}\right)^{0,286}} - 68;$$

$$T_s = 2262 + \Delta T_s;$$

$$B = \lg\left(\tau(0,102 p_{\text{к}})^2\right);$$

$$I_0 = -1,958 - 5,0318B - 3,3958B^2 - 0,518B^3 + 0,2685B^4 + 0,1092B^5 + 0,01073B^6.$$

Далее масса вредных выбросов каждого компонента ЗВ на основном участке полета определяется как сумма произведений соответствующих индексов эмиссии на величину расхода топлива и время наработки на основном участке с учетом количества двигателей на ВС.

Методика не позволяет решать задачи мониторинга выбросов ЗВ авиадвигателями ВС 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 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 (1.1).

2. Вызывает сомнения достоверность расчетов EI_{NOx} в полетных условиях с помощью комплексного параметра K как в силу уже отмеченных причин, так и в силу отсутствия строгой обоснованности изложенной последовательности расчета K .

3. В методике отсутствует механизм проверки достоверности производимых с ее помощью расчетов.

4. Методика не позволяет оценивать выбросы других типов ЗВ – таких, например, которые включены в «Киотский протокол», ратифицированный в России.

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

2. Оценка возможности использования ОНД-86 для расчета концентраций вредных выбросов от ВС

«Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий» (ОНД-86) [3] в настоящее время является основным официальным документом, устанавливающим требования в части расчета концентраций вредных веществ в атмосферном воздухе при размещении и проектировании предприятий, нормировании выбросов в атмосферу реконструируемых и действующих предприятий, а также при проектировании воздухозаборных сооружений.

Методика предназначена для расчета приземных концентраций в двухметровом слое над поверхностью земли, а также вертикального распределения концентраций.

Общесоюзный нормативный документ (ОНД-86) состоит из восьми разделов и трех приложений. Основные разделы:

1. Общие положения.
2. Расчет загрязнения атмосферы выбросами одиночного источника.
3. Расчет загрязнения атмосферы выбросами линейного источника.
4. Учет влияния рельефа местности при расчете загрязнения атмосферы.
5. Расчет загрязнения атмосферы выбросами группы источников и площадных источников.
6. Расчет загрязнения атмосферы с учетом суммации вредного действия нескольких веществ.
7. Учет фоновых концентраций при расчетах загрязнения атмосферы и установление фона расчетным путем.
8. Нормы по определению минимальной высоты источников выброса, установлению предельно допустимых выбросов и определению границ санитарно-защитной зоны предприятий.

Для хозяйственной деятельности аэропорта характерно наличие разнообразных источников загрязнения атмосферного воздуха – от типично промышленных (котельные, ремонтно-производственные участки, топливохранилища и системы заправки, участки лако-красочных работ и др.) и средств наземного пассажирского и технического транспорта до воздушных судов.

Методики ОНД-86 ориентированы на расчет концентраций вредных веществ в атмосферном воздухе от промышленных источников загрязнения. Специфика работы авиадвигателей ВС в районе аэропорта и уровень параметров в выхлопной струе требуют более детального рассмотрения вопроса о применимости методик ОНД-86 к расчету концентраций вредных веществ в атмосферном воздухе от авиационных двигателей. Для этого вначале целесообразно рассмотреть характерную последовательность и условия расчета концентраций вредных веществ в методиках ОНД-86.

Обзор методики расчета концентраций вредных веществ в атмосферном воздухе

Воздушное судно является одиночным источником загрязнения атмосферы, поэтому для анализа используем методику расчета загрязнения атмосферы выбросами от одиночного источника.

В соответствии с этой методикой для случая горячего выброса (типичного для ВС) максимальное значение приземной концентрации вредного вещества c_m (мг/м³) при выбросе газозвушной смеси из одиночного точечного источника с круглым устьем достигается при неблагоприятных метеорологических условиях на расстоянии x_m (м) от источника и определяется по формуле

$$c_m = \frac{AM F m n \eta}{H^2 \sqrt[3]{V_1 \Delta T}}, \quad (2.1)$$

где A - коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы; M (г/с) - масса вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу в единицу времени; F - безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания вредных веществ в атмосферном воздухе (в зависимости от агрегатного состояния вредного вещества – газ, мелкодисперсные аэрозоли, пыль и т.д.); m и n – коэффициенты, учитывающие условия выхода газозвушной смеси из устья источника выброса; H (м) - высота источника выброса над уровнем земли (для наземных источников при расчетах принимается $H = 2$ м); η - безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности, в случае ровной или слабопересеченной местности с перепадом высот, не превышающим 50 м на 1 км, $\eta = 1$; ΔT (°C) - разность между температурой выбрасываемой газозвушной смеси T_e и температурой окружающего атмосферного воздуха T_a ; V_1 (м³/с) - расход газозвушной смеси, определяемый по формуле

$$V_1 = \frac{\pi D^2}{4} \omega_0, \quad (2.2)$$

где D (м) - диаметр устья источника выброса; ω_0 (м/с) - средняя скорость выхода газозвушной смеси из устья источника выброса.

Значение коэффициента A , соответствующее неблагоприятным метеорологическим условиям, при которых концентрация вредных веществ в атмосферном воздухе максимальна, принимается по рекомендациям ОНД-86 в диапазоне от 140 до 250 в зависимости от региона страны.

Значения коэффициентов m и n определяются в зависимости от параметров f , v_m , v'_m и f_e .

$$f = 1000 \frac{\omega_0^2 D}{H^2 \Delta T}; \quad (2.3)$$

$$v_m = 0,65 \sqrt[3]{\frac{V_1 \Delta T}{H}} ; \quad (2.4)$$

$$v'_m = 1,3 \frac{\omega_0 D}{H} ; \quad (2.5)$$

$$f_e = 800 (v'_m)^3 . \quad (2.6)$$

При этом в зависимости от значений, указанных в (2.3)-(2.6) параметров значения m и n , рассчитываются по различным формулам.

Методика предусматривает также определение расстояния x_m (м) от источника выбросов, на котором приземная концентрация c (мг/м³) при неблагоприятных метеорологических условиях достигает максимального значения c_m , которое определяется по формуле

$$x_m = \frac{5 - F}{4} d H , \quad (2.7)$$

где безразмерный коэффициент d находится по различным формулам в зависимости от значений f, v_m .

По методике также можно найти значение опасной скорости u_m (м/с) на уровне флюгера (обычно 10 м от уровня земли), при которой достигается наибольшее значение приземной концентрации вредных веществ c_m . Для u_m также проводится ряд выражений в зависимости от значений f, v_m . При этом могут быть использованы и графические зависимости.

Максимальное значение приземной концентрации вредного вещества $c_{ми}$ (мг/м³) при неблагоприятных метеорологических условиях и скорости ветра u (м/с), отличающейся от опасной скорости ветра u_m (м/с), определяется по формуле

$$c_{ми} = r c_m, \quad (2.8)$$

где r - безразмерная величина, определяемая в зависимости от отношения u/u_m по приведенным графику или формулам.

Расстояние от источника выброса $x_{ми}$ (м), на котором при скорости ветра u и неблагоприятных метеорологических условиях приземная концентрация вредных веществ достигает максимального значения $c_{ми}$ (мг/м³), определяется по формуле:

$$x_{ми} = p x_m, \quad (2.9)$$

где p - безразмерный коэффициент, определяемый в зависимости от отношения u/u_m по приведенным графику или формулам.

При опасной скорости ветра u_m приземная концентрация вредных веществ c (мг/м³) в атмосфере по оси факела выброса на различных расстояниях x (м) от источника выброса определяется по формуле

$$c = s_1 c_m, \quad (2.10)$$

где s_1 - безразмерный коэффициент, определяемый в зависимости от отношения x/x_m и коэффициента F по приведенным графикам или формулам.

Расчеты распределения концентрации c_z (мг/м³) на разных высотах z (м) над подстилающей поверхностью при $x < x_{ми}$ производятся по формуле

$$c_z = r c_m s_z s_2 . \quad (2.11)$$

Для определения значений c_m, r и s_2 приводятся формулы и графики, а коэффициент s_z определяется в зависимости от параметров b_1 и b_2 также по приведенным формулам и графикам.

Опасная скорость ветра u_{mz} (м/с) на уровне флюгера, при которой на высоте z достигается максимальная концентрация, определяется по формуле

$$u_{mz} = l_1 u_m . \quad (2.12)$$

Коэффициент l_1 определяется в зависимости от x/x_m по графику.

Специфика функционирования ВС в районе аэропорта

Имеется ряд характерных особенностей функционирования ВС в районе аэропорта.

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 для расчета концентраций вредных веществ в атмосферном воздухе от авиадвигателей воздушных судов.

3. Обзор методики европейского агентства охраны окружающей среды ЕЕА ЕМЕП/CORINAIR

Общая характеристика

Методика Европейского агентства охраны окружающей среды ЕЕА ЕМЕП/CORINAIR [4] устанавливает стандартные методы расчета выбросов ЗВ с использованием стандартных циклов ЛТО и на крейсерских режимах полета (высоты более 1000 м). Все ВС, являющиеся источником загрязнения, делятся на 4 категории:

Категория 1. Гражданские самолеты, осуществляющие регулярные полеты с использованием установленных правил полетов по приборам IFR (Instrumental Flight Rules).

Категория 2. Гражданские ВС, эксплуатируемые по правилам визуальных полетов VFR (Visual Flight Rules).

Категория 3. Гражданские вертолеты, которые в отдельных случаях могут быть заметным источником локального загрязнения (например, при регулярных полетах в черте городской застройки).

Категория 4. Эксплуатация военных самолетов.

Подчеркивается, что выбросы ЗВ при эксплуатации ВС зависят от:

типа ВС;
 типа применяемых авиадвигателей и вида топлива;
 характеристики эмиссии используемых двигателей;
 расположения источника выбросов в пространстве (маршруты, высота полета и др.);
 интенсивности полетов ВС по установленным трассам.

Документ содержит четкую классификацию существующих методов расчета выбросов ЗВ от гражданских ВС, которые с учетом степени их сложности, подразделяются на:

простейшие;
 простые;
 детальные.

При расчете выбросов ЗВ в приземном слое используются подходы на основе стандартного ВПЦ ИКАО, а в крейсерском полете - на основе учета израсходованного топлива и дальности полета. В методике приводится описание соответствующих методологий, а также типичные блок-схемы, определяющие последовательность выполняемых при этом расчетов.

Краткая характеристика методик CORINAIR различного уровня

Характерные принципы построения методик CORINAIR различного уровня изложены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Характеристики методик различного уровня

Методика		ВПЦ	Набор высоты и крейсерский полет
Очень простая	Область действия	Стандартный ВПЦ ИКАО	Остаток топлива после ВПЦ
	Фактор эмиссии	ВС - прототип	ВС - прототип
Простая	Область действия	Стандартный ВПЦ ИКАО для конкретного типа ВС (ВС- прототип)	Остаток топлива после ВПЦ
	Фактор эмиссии	Конкретный тип ВС	Один ВС - прототип
Детальная	Область действия	Стандартный ВПЦ ИКАО для конкретного типа ВС (с учетом конкретного типа двигателя). Действительное время этапов ВПЦ (если возможно), иначе - стандартный ВПЦ ИКАО	Фактическая дальность полета. Независимая оценка расхода топлива в основном участке полета
	Фактор эмиссии	Конкретный тип ВС (и двигателя), иначе ВС – прототип	Конкретный тип ВС (и двигателя), иначе ВС – прототип. Фактическая дальность полета

Обе простые методики базируются на использовании данных стандартного ВПЦ а также на информации о количестве приобретенного и использованного топлива. Принимается, что количества приобретенного и использованного топлива равны. Характерной особенностью очень простой методики является использование ВС – прототипа, что, собственно говоря, и устанавливает условия применимости этой методики, а именно – недостаточная информация (или ее отсутствие) об эмиссионных характеристиках двигателей конкретного ВС и о действительной продолжительности этапов ВПЦ. В итоге по оценкам разработчиков этой методики погреш-

ность расчетных оценок выбросов загрязняющих веществ может достигать 40% по сравнению с их действительными значениями.

Погрешность простой методики заметно ниже (до 20%), прежде всего, за счет использования (если возможно) эмиссионных данных конкретного типа ВС. При этом используются данные по продолжительности этапов стандартного ВПЦ ИКАО.

Наименьшую погрешность (до 10-12%) расчетных оценок выбросов ЗВ дает детальная методика. Такие погрешности следует признать удовлетворительными в условиях авиатранспортного производства. Однако для этого необходимо использовать эмиссионные характеристики конкретного двигателя на конкретном ВС, а также данные по действительной продолжительности этапов ВПЦ в конкретных условиях эксплуатации.

Итоговое представление результатов расчетов выбросов ЗВ по методике CORINAIR сводится в таблицу, в которой указываются показатели эмиссии в зависимости от дальности полета. В связи с этим необходимо сделать два замечания.

Во-первых, разбивка результатов расчета по расстояниям для российских условий не представляется продуктивной, т.к. при больших расстояниях (например, по маршруту Москва-Владивосток-Москва) время полета туда и обратно может быть (и является) различным. Следовательно, при одном расстоянии, но разном времени полета расход топлива и величина выбросов ЗВ также будут различны. Кроме этого, рассчитать все возможные комбинации расстояний полета практически нереально, а использование типовых таблиц снижает достоверность результатов расчета. Таким образом, в целом подход CORINAIR увеличивает погрешность расчетов.

Во-вторых, сама форма представления результатов расчета выбросов ЗВ по методике CORINAIR перегружена данными, которые не зависят от дальности полета (индексы эмиссии, данные по выбросам на этапах ВПЦ) и, следовательно, в итоговом протоколе являются просто лишними.

4. Обзор методики расчета концентраций ЗВ в районе аэропорта

Анализ моделирования распространения примеси ЗВ от залпового точечного источника выброса под действием ветра и атмосферной диффузии

В методике [2] предлагается в качестве модельного уравнения брать уравнение турбулентной диффузии с постоянными коэффициентами, при этом примесь предполагается пассивной, а ось X совпадает с направлением ветра. Приводится следующее уравнение:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_a \frac{\partial c}{\partial x} = k_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}. \quad (4.1)$$

Следует сразу отметить грубую ошибку в вышеприведенном уравнении: в конвективной составляющей полной производной от концентрации по времени в левой части уравнения вместо $u_a \frac{\partial c}{\partial t}$ следует положить $u_a \frac{\partial c}{\partial x}$. Таким образом, верное уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_a \frac{\partial c}{\partial x} = k_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}.$$

Ошибочность исходного уравнения не может привести к правильному результату, и поэтому неясно, каким образом было получено найденное в методике решение:

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

Здесь M (г/с) – залповый выброс массы ЗВ за 1 секунду работы двигателей ВС; u_e (м/с) – скорость ветра; x_ϕ, y_ϕ, z_ϕ – декартовы координаты фиктивного источника (о котором будет упомянуто ниже); H – высота всплывания облака ЗВ.

Далее, как следует из вида уравнения (4.1), в рассматриваемой модели скорость ветра и его направление считаются постоянными на всём протяжении интересующего интервала времени. Это предположение накладывает некоторые ограничения на моделируемую ситуацию. При достаточном суточном изменении направления и интенсивности ветра для некоторого рассматриваемого объекта для сохранения адекватности рассматриваемого подхода нужно каждый раз задавать скорость ветра в качестве входящей в модельное уравнение константы, а также менять ориентацию системы координат в соответствии с направлением ветра.

В методике отклонение направления ветра на 45° является границей применимости, хотя, очевидно, если предположить наличие отклонения направления ветра на 30° , то в левой части уравнения (4.1) будет отсутствовать компонента конвективной составляющей полной производной по времени величины того же порядка, что и другие слагаемые:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_{ax} \frac{\partial c}{\partial x} + u_{ay} \frac{\partial c}{\partial y} = k_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2},$$

здесь u_{ax}, u_{ay} – проекции скорости ветра (величины одного порядка) на координатные оси соответственно x и y .

Для более точного и математически обоснованного моделирования процесса диффузии необходимо решать уравнение (4.1) в частных производных. Следует также иметь в виду, что с увеличением высоты над уровнем взлётной полосы возрастает скорость ветра и падает атмосферное давление, а значит, и множитель u_e будет зависеть от пространственной координаты z , т.е.: $u_e = u_e(z)$. Указанное небольшое усложнение модельного уравнения не приведёт к значительным временным затратам по численному решению уравнения (4.1), тем не менее позволит решать задачу в более качественной постановке.

Анализ моделирования процесса переноса ЗВ выхлопной струей авиадвигателей

В качестве исходных пунктов в моделировании процесса переноса ЗВ выхлопной струей авиадвигателей выбраны наиболее оптимальные модельные задачи: спутные и полузатопленные струи. Хотя нечто более конкретное, чем общие ссылки, не представлено: не ясно, какой из этих задач и в каких случаях пользовались авторы для получения полуэмпирических зависимостей, впоследствии опубликованных в методике.

Ещё одним существенным ограничением на круг рассматриваемых задач является нижняя граница скорости ветра: не менее 5 м/с. При меньшей скорости ветра предлагается просто положить скорость ветра равной 5 м/с. Таким образом, приведённая длина струи равна:

$$\bar{S} = \frac{12.4 \cdot r_0 \cdot u_{jet} \cdot (1 \pm m)}{u_a \sqrt{n}},$$

здесь знак плюс – при встречном ветре, минус – при попутном; $m = \frac{u_e}{u_c}$, для $u_e > 5$ м/с и

$n = \frac{t_c}{t_e}$; если $u_e < 5$ м/с, то $u_e = 5$ м/с; u_e – скорость ветра; t_e – температура окружающего воздуха; u_c, t_c – соответственно скорость и температура газов на срезе сопла; $\bar{S} = S/r_0$ – приведённая длина струи, где r_0 – радиус среза сопла.

Ещё одна грубая ошибка допущена при определении проекций струи на оси декартовой системы координат:

$$X = S \cdot \cos(\theta),$$

$$Y = S \cdot \sin(\theta);$$

где θ - угол между направлением струи и осью X .

Высота H всплывания струи к моменту её полного затухания определена не для всех значений скорости ветра:

$$H = h_{\text{ог}} + 37.0/u_g, \text{ при } u_g > 3 \text{ м/с};$$

$$H = h_{\text{ог}} + 12.3 + 3.9 \cdot (3.0 - |u_g|), \text{ при } 0.5 < u_g < 3 \text{ м/с}.$$

Здесь $h_{\text{ог}}$ - высота расположения двигателя над поверхностью земли.

Не обоснован и выбор последовательной модели процесса переноса ЗВ: сначала происходит затухание кинетики струи, а затем вступают в силу процессы рассеивания примесей ЗВ под действием атмосферной турбулентности. При этом из виду упускается важный элемент взаимодействия этих двух процессов, в котором рассеивание происходит намного эффективнее с участием кинетики струи и, таким образом, использование рассматриваемой методики может давать заведомо завышенные концентрации ЗВ.

Предположение о равенстве продольной и вертикальной дисперсий:

$$\sigma_x = \sigma_z,$$

является некорректным, поскольку подобной симметрии нет как в выборе направления движения ветра, так и в неравномерности атмосферного давления и скорости ветра по высоте. Что же касается поперечной дисперсии, то попытка учесть наличие нескольких двигателей у ВС ограничилась лишь рассмотрением ВС с двумя установленными двигателями:

$$\sigma_y = \sigma_z + \Delta\sigma_y,$$

здесь $\Delta\sigma_y = 0.465 \cdot L_{\text{ог}}$ - деформация облака ЗВ по оси Y при работе двух двигателей, где $L_{\text{ог}}$ - расстояние между осями крайних работающих двигателей.

При этом из рассмотрения выпадают ВС с иным расположением двигателей.

Следующим элементом произвола в рассматриваемой модели является переход от реального источника ЗВ к фиктивному. В первую очередь не учитывается экраный эффект поверхности взлётной полосы, суть которого состоит в следующем. В процессе развития и расширения истекающей из двигателя струи характерный размер струи увеличивается, а значит, расширяющаяся зона смещения неизбежно достигает непроницаемой поверхности взлётной полосы – происходит «процесс отражения», струя уходит вверх. Это, в свою очередь, уменьшает концентрацию ЗВ у поверхности земли и увеличивает интенсивность рассеивания ЗВ. Причём этот эффект даёт значительный вклад в процесс рассеивания, поскольку большую часть времени пребывания в зоне аэропорта и прилегающей территории ВС находится на поверхности земли, в непосредственной близости от «отражающей поверхности». Следовательно, пренебрежение таким процессом в итоге приводит к завышенным концентрациям ЗВ.

Анализ моделирования движения воздушных судов и рекомендуемых вычислительных процедур

Для определения осреднённых концентраций в заранее заданном интервале времени в [2] предлагается моделировать все сценарии движения ВС в соответствующем интервале времени. Для этого предлагается ввести дополнительную декартову систему координат, связанную с ВПП таким образом, что одна из координатных осей совпадает с направлением ВПП, причём начало координат располагается на одном из торцов ВПП. Сами же сценарии движения ВС по территории аэропорта предлагается разбить на элементарные участки, представляющие собой траектории прямолинейного движения ВС или участки с постоянным режимом работы двигате-

лей. Очевидно, это можно сделать с достаточной долей точности при подробном разбиении на маневровых участках, но тогда для участков, дающих малый вклад в общую концентрацию, придётся производить неоправданно большое количество вычислений.

На самих же элементарных участках текущие координаты x' , y' , z' ВС будут вычисляться по тривиальным формулам:

$$x' = x_0 + u_{\text{вс}} t' + \frac{\alpha_{\text{вс}} t'^2}{2};$$

$$y' = y_0 + v_{\text{вс}} t' + \frac{\beta_{\text{вс}} t'^2}{2};$$

$$z' = z_0 + w_{\text{вс}} t' + \frac{\gamma_{\text{вс}} t'^2}{2},$$

здесь x_0, y_0, z_0 - начальные координаты ВС на рассматриваемом этапе движения; t' - время, истекшее от начала этапа; $u_{\text{вс}}, v_{\text{вс}}, w_{\text{вс}}$ - компоненты скорости ВС; $\alpha_{\text{вс}}, \beta_{\text{вс}}, \gamma_{\text{вс}}$ - компоненты ускорения ВС. После определения положения ВС во все рассматриваемые моменты времени (в методике речь идёт о шаге в 1 секунду, хотя целесообразнее, опять же, дискретизацию по времени брать исходя из интенсивности работы двигателей на данном этапе и скорости движения ВС) рекомендуется определять положения соответствующих фиктивных источников ЗВ, о проблемных и ошибочных моментах модели которых уже было сказано выше. Далее производится расчёт концентрации ЗВ путём суммирования концентраций от всех фиктивных источников.

Следует также учесть тот факт, что уравнение (4.1) и последние расчёты положений фиктивных источников велись в различных системах координат. Поэтому для достижения верного (с точностью, характерной для данной модели) результата ещё необходимо привести в соответствие эти два подхода.

Анализ идентификации параметров атмосферной турбулентности

Необходимо также признать несостоятельность выбора постоянства коэффициентов атмосферной диффузии k_x, k_y, k_z . Действительно, расчёт необходимо вести с учетом распределения параметров атмосферы (включая скорость и направление ветра) по высоте. Расчет такого типа не вызвал бы неоправданное усложнение модели (вопреки мнению авторов методики), тем более что речь идёт именно о состоятельности модели, её применимости и истинности. При этом никакой неопределенности ни в аналитическом, ни в численном решениях не возникает. Безусловно, выбор коэффициентов атмосферной диффузии является неким элементом произвола в модели, но просто полагать значения этих коэффициентов постоянными было бы неверно. Например, с ростом высоты над поверхностью земли атмосферная диффузия становится интенсивнее, и поэтому при использовании околосредних значений параметров искажается результат расчётов в пользу завышенных концентраций ЗВ.

Задача определения коэффициентов атмосферной диффузии сложна, но выбор хотя бы полуэмпирической, линейно зависящей от высоты модели k_z позволило бы в значительной мере учесть указанные особенности рассматриваемой задачи. К тому же авторами [2] были перечислены три различных по сложности и детальности способа определения k_x, k_y, k_z , но выбор был сделан в пользу постоянства коэффициентов, согласно некоему результату (конкретная ссылка на него не была указана). Таким образом, и этот важный элемент модели был неоправданно упрощён в целях сокращения затрат машинного счёта и простоты уравнений, хотя в настоящее время вычислительная техника позволяет производить намного более сложные расчёты за доступное время.

Указанные грубые ошибки в методике [2] и другие недостатки ставят под сомнение адекватность предлагаемой модели. К основным недостаткам следует также отнести следующее: методика изначально выдаёт завышенные показатели концентрации, что необоснованно может привести к расширению границ санитарной зоны, а значит, и увеличению выплат со стороны аэропортов и транспортных компаний.

5. Заключение

Результаты выполненного обзора показывают, что существующее отечественное методическое обеспечение расчетных оценок выбросов ЗВ авиадвигателями не соответствует современным экономическим условиям и содержит ряд серьезных ошибок. Кроме этого, разработанные давно отечественные методики не могут быть гармонизированы с аналогичными зарубежными методиками, что усложняет проблему сопоставимости результатов при выполнении международных авиаперевозок.

Таким образом, не вызывает сомнений необходимость разработки новых отечественных методик как для оценки величины валовых выбросов ЗВ авиадвигателями ВС, так и для расчета концентраций ЗВ в районе аэропорта, таких, которые были бы свободны от указанных недостатков, гармонизированы с зарубежными аналогами и соответствовали последним рекомендациям ИКАО [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Методика расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферу двигателями основных типов воздушных судов ГА. Министерство гражданской авиации, ГосНИИ ГА. - М., 1991.
2. Методика контроля загрязнения атмосферного воздуха в окрестностях аэропорта. Министерство транспорта России, ГосНИИ ГА. - М., 1992.
3. ОНД-86.
4. Air traffic (SNAP Codes: 080501-080504). Emission Inventory Guidebook, Dec. 2001.
5. Report of WG2 TG4 – Airport Air Quality: Emissions LAQ Guidance. Committee on Aviation Environmental Protection (CAEP). Seventh meeting. Montréal, 5 Feb to 16 Feb 2007.

THE ANALYSIS OF MODERN METHODOLOGICAL BASIS FOR AVIATION ENGINES POLLUTANTS CALCULATIONS

Kartishev O.A., Medvedev V.V.

The analysis of modern methodical basis for aviation engines pollutants calculations is accomplished in the article. Short description of each official methodic is presented with estimation of its accuracy for aviation transport. It is shown, that it is necessary to elaborate new methodics for pollutant mass and concentration calculation near airport.

Сведения об авторах

Картышев Олег Алексеевич, 1949 г.р., окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения (1976), кандидат технических наук, начальник отдела 128 ГосНИИ ГА, автор более 50 научных работ, область научных интересов – авиационная акустика, экология воздушного транспорта, история гражданской авиации.

Медведев Владимир Владимирович, 1958 г.р., окончил Рижский Краснознаменный институт инженеров гражданской авиации (1981), кандидат технических наук, начальник отдела 603 ЦИАМ, доцент кафедры ДЛА МГТУ ГА, автор более 40 научных работ, область научных интересов – авиационное двигателестроение.