

УДК 004.94:[504.3.054:656.71]

ОБЗОР КОНЦЕПЦИЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ВОЗДУХА АЭРОПОРТОВ

О.А. КАРТЫШЕВ, В.Ю. ЛЕОНОВ

*Центр экологической безопасности гражданской авиации,
г. Москва, Российская Федерация*

Аннотация. Выполнен обзор основных физических концепций, включенных в моделирование дисперсии и расчетных компьютерных моделей, используемых в настоящее время для прогнозирования концентраций загрязняющих веществ как на территории, так и в окрестностях аэропортов при оценке качества воздуха. В основном, различия между ними заключаются в количестве рассматриваемых физических процессов, их степени сложности, допущениях, области применения, а также в математическом аппарате, описывающем физический процесс. Анализ расчетных моделей позволяет отметить одну важную особенность: большинство методик рассматривают ВС как точечный объемный или площадной источник загрязняющих веществ без учета скорости, направления движения и температуры струи газов от двигателей воздушного судна. Моделируя задачу расчета загрязнения воздуха с помощью упрощенных моделей описания физических процессов и выстраивая решение на эмпирических соотношениях, представляется возможным получить лишь приблизительный расчет концентраций. Для точного решения задачи расчета загрязнения воздуха от струи газозвушной смеси при работе двигателей воздушного судна предлагается решение системы уравнений: непрерывности, момента, смеси с N компонентами, энергии и состояния. Учитывая высокую скорость и температуру истекающих струй, рассматривается движение вязкого, сжимаемого газа, когда в качестве модели обычно выбирают турбулентности с использованием комбинации $k-\omega$ и $k-\epsilon$ – модель SST $k-\omega$. Особо сложные случаи могут быть рассмотрены с использованием метода моделирования крупных вихрей (LES).

Ключевые слова: моделирование, загрязняющие вещества, рассеивание, концентрации, аэропорт

OVERVIEW OF MODELING CONCEPTS AND CALCULATION MODELS USED TO ASSESS AIRPORT AIR QUALITY

O.A. KARTYSHEV, V.YU. LEONOV

Center for Environmental Safety of Civil Aviation, Moscow, Russian Federation

Abstract. A review of the main physical concepts included in dispersion modeling and computational computer models that are currently used to predict the concentrations of pollutants both in the territory and in the vicinity of airports in assessing air quality is carried out. Basically, the differences between them lie in the number of physical processes under consideration, their degree of complexity, assumptions, field of application, as well as in the mathematical apparatus describing the physical process. The analysis of computational models allows us to note one important feature: most of the methods consider aircraft as a point volumetric or area source of pollutants without taking into account the speed, direction of movement and temperature of the gas jet from the aircraft engines. Modeling the problem of calculating air pollution using simplified models for describing physical

processes and building a solution on empirical relationships, it seems possible to obtain only an approximate calculation of concentrations. For an accurate solution of the problem of calculating air pollution from a jet of a gas-air mixture during operation of aircraft engines, it is proposed to solve a system of equations: continuity, moment, mixture with N components, energy and state. Taking into account the high speed and temperature of the outflowing jets, the motion of a viscous, compressible gas is considered, when turbulence is usually chosen as a model using a combination of $k-\omega$ and $k-\epsilon$ - the SST $k-\omega$ model. Particularly difficult cases can be addressed using the Large Eddy Simulation (LES) method.

Keywords: modeling, pollutants, dispersion, concentrations, airport

Введение

Оценка воздействия на окружающую среду, связанная с деятельностью аэропортов, чаще всего ассоциируется с авиационным шумом, качеством воды, загрязнением воздуха, удалением отходов, энергопотреблением и местной экологией в его окрестностях. Негативное воздействие проявляется на персонале аэропортов, пассажирах и населении приаэродромных территорий. Неблагоприятное влияние, оказываемое функционированием аэропортов, принято характеризовать по уровням и границам негативного воздействия факторов загрязнения окружающей среды при эксплуатации наземных и воздушных источников. Указанные границы обосновываются расчетными, реже инструментальными методами.

Обзор результатов опросов среди населения, проживающего в непосредственной близости от крупнейших аэропортов мира, включая аэропорты России [1, 2] и проводимых ими защитных мероприятий, показал приоритеты экологических проблем (рис. 1). Для 35 (60 %) из 60 рассмотренных аэропортов воздействие авиационного шума (далее – АШ) является основным раздражителем для населения; в 12 (24 %) и 7 (13 %) аэропортах отмечено неудовлетворительное состояние водоемов и воздуха соответственно; 6 (3 %) аэропортов имеют ограничения по совместимости с использованием прилегающих территорий.



Рис. 1. Приоритет экологических проблем для крупнейших аэропортов мира

Как видно из рис. 1, неудовлетворительное качество воздуха контрастирует с оценкой АШ, чей вклад обычно является доминирующим компонентом. Вместе с тем, ИКАО признает,

что источники выбросов, связанные с аэропортами, могут выделять загрязняющие вещества (далее – ЗВ), которые могут способствовать ухудшению качества воздуха в близлежащих населенных пунктах [3]. Еще одним сопутствующим приоритетным компонентом выбросов ЗВ является запах авиационного керосина при неблагоприятном направлении ветра от аэропорта и его инфраструктуры в сторону населенного пункта. Для нашей страны это чаще всего территории бывших и действующих авиагородков. К сожалению, исследований этого воздействия не проводится.

В аэропорту выбросы происходят в различных местах и в различные периоды времени в зависимости от назначения и эксплуатационных характеристик источника. Стационарные источники могут быть представлены транспортными средствами и оборудованием, используемым при обслуживании воздушных судов (далее – ВС), котельными, инсинераторами, стоянками аэропортового транспорта на аэропортовой территории и на парковках за ее границами, тогда как ВС, тягачи, аэродромные машины, автомобили при движении на аэропортовой территории и на дорогах при подъезде к нему рассматриваются как передвижные источники.

Пространственное распределение ЗВ для стационарных источников достаточно подробно описано и не представляет сложности для проектировщиков с использованием известных программ расчета на ЭВМ, тогда как оценка прогнозируемой концентрации ЗВ при эксплуатации ВС представляет значительный исследовательский интерес.

Известно, что авиационная эмиссия более мобильна, происходит в разных местах на территории аэропорта, в разное время суток и характеризуется различной интенсивностью на локальные концентрации территории летного поля. Эмиссия от двигателей ВС, образующаяся во время взлета и посадки, выявляется и за пределами землеотвода аэропорта до местной высоты смешения, которая при эталонном взлетно-посадочном цикле (далее – ВПЦ) принимается равной 915 метров или 3000 футов над уровнем земли [3].

Атмосферные движения воздуха (воздушных масс) определяют общее направление, в котором распространяются выбросы, тем самым создавая «шлейф» распространения ЗВ. Направление шлейфа определяется крупномасштабным движением воздуха, таким как средний ветровой поток, в то время как перемешивание больше связано с мелкомасштабными вихрями в потоке, называемыми турбулентностью, что влияет на атмосферную дисперсию и приводит к трехмерному (например, «3-D») распределению, обычно зависящему от времени распределения концентрации выбрасываемого следового вещества (загрязнителя).

Обычной мировой практикой является прогнозирование концентраций за один час для определения наихудшего часа дня или наибольшего последовательного периода часов в зависимости от загрязняющего вещества и применимых правил. Здесь следует отметить, что в нашей стране принято выполнять оценку для 20–30-минутного интервала осреднения.

Выброс загрязнений в окружающую среду, связанных с эксплуатацией авиационных двигателей, происходит из его сопла. Степень загрязнения атмосферы после выброса зависит от ряда факторов, таких как тип и количество авиадвигателей, режим и время их работы, расстояние от источника загрязнения до земной поверхности, погодных условий и многих других. Попадая в атмосферу, выброс подвергается воздействию внешних условий: давления, температуры, влажности, диффузной составляющей атмосферы, скорости и направления ветра. Струи продуктов сгорания, выбрасываемых из двигателей, взаимодействуют друг с другом, с самолетом и с окружающей средой. В результате этого взаимодействия происходит окисление продуктов сгорания авиатоплива и образование новых соединений.

Концепции моделирования атмосферной дисперсии

Модель Гаусса. Модель Гаусса основывается на известном аналитическом решении уравнения диффузии (1) в сочетании с полуэмпирической параметризацией основных физических явлений:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + S \quad (1)$$

где C – концентрация загрязняющего вещества (ЗВ); u – скорость ветра;

K – коэффициенты турбулентной диффузии; S – функция источника.

Одно из серьезных ограничений классической модели Гаусса при моделировании рассеивания частиц состоит в использовании приближения стационарного состояния источника, однако это можно преодолеть, аппроксимируя выбросы как серию, состоящую из гауссовских шлейфов, решением которого является уравнение (2), описывающее гауссов шлейф:

$$C(r, y, z, t) = \frac{Q_T}{8(\pi r)^{3/2}} \exp\left(\frac{-(x-ut)^2 + y^2}{4r}\right) \left\{ \exp\left[\frac{-(z-H)^2}{4r}\right] + \exp\left[\frac{-(z+H)^2}{4r}\right] \right\} \quad (2)$$

где C – ЗВ; u – скорость ветра; K – коэффициент турбулентной диффузии;

дисперсия шлейфа $\sigma^2(x) = \frac{2}{u} \int_0^x K(\xi) d\xi = 2r$; Q_T – общая масса выброса [кг].

В этом подходе каждый шлейф ведет себя в соответствии с уравнением дисперсии и общий вклад источника рассчитывается путем интегрирования отдельных шлейфов по времени и суммирования вклада каждого из них. Отсутствие кинетики струи предполагает отсутствие взаимодействия между шлейфами, что неприемлемо при моделировании струй из двух и более двигателей ВС.

Дополнительные ограничения связаны с тем, что гауссовские модели не предназначены для моделирования дисперсии в условиях слабого ветра или в местах, близких к источнику, то есть на расстояниях менее 100 м, что характерно, например, для оценки операций руления ВС. Также было показано, что гауссовские модели постоянно переоценивают концентрации в условиях слабого ветра [4] и не могут учесть метеорологические изменения (направление и скорость ветра, состояние атмосферы) в пространстве и во временном интервале, в котором рассчитывается поле концентрации. Результаты упрощенного рассмотрения турбулентности подходят для расчета почасовых концентраций загрязняющих веществ в ближнем поле [5].

Несмотря на существенные ограничения, гауссовские модели обрели популярность благодаря высокой скорости расчета во времена маломощных персональных компьютеров, а также аналитическому решению, позволяющему описывать простейшие ситуации.

Модель Лагранжа. Модель Лагранжа основана на вычислении траекторий движения частиц ЗВ. При этом система отсчета не является фиксированной, а следует за облаком, описываемым большим количеством частиц, выброшенных в атмосферу. В отличие от детерминированных дифференциальных уравнений в частных производных моделей Эйлера, здесь для каждой частицы решается стохастическое дифференциальное уравнение типа Ланжевена относительно их скорости. При этом предполагается, что турбулентные скорости следуют Марковскому процессу [6]. Траектории ЗВ описываются детерминированными (ветер и всплывание) и стохастическими (атмосферная турбулентность) эффектами. Интегрируя по времени можно получить положение каждой из них. Окончательное распределение большого количества частиц дает оценку поля концентрации. Трехмерное уравнение Ланжевена (3) для неоднородной турбулентности имеет вид:

$$\frac{du_i}{dt} = a_i(x_i, u_i) + b_i(x_i, u_i)\xi_i(t) \quad (3)$$

где u_i – турбулентная скорость; a_i – детерминированный член;

$b_i \xi_i(t)$ – стохастический член;

$\xi_i(t)$ – нормальное распределение со средним равным 0 и дисперсией равной dt .

Основная сила лагранжевых моделей состоит в том, что они рассматривают конвекцию без какого-либо приближения и отсутствует расчетная сетка, что позволяет точно фиксировать различные турбулентные структуры в статистическом смысле и избегать численных ошибок,

которые могут возникнуть в моделях Эйлера, особенно вблизи источника [4]. Вычислительная стоимость лагранжевых моделей не зависит от разрешения расчетной сетки, поэтому этот подход исключительно эффективен для моделирования на малых расстояниях по сравнению с расчетами на сетке с очень высоким разрешением.

В отличие от гауссовских моделей, лагранжевы модели не ограничиваются квазистационарной дисперсией. Источники любой формы и количества могут обрабатываться точно и одновременно. В ближнем поле источников дается более точное описание дисперсии по сравнению с моделями, основанными на классическом уравнении диффузии, что позволяет детально учесть динамические эффекты выхлопных газов источника с применением трехмерных полей ветра и турбулентности. Ядро модели лагранжевых частиц не содержит настраиваемых параметров. Он основан на метеорологических параметрах, которые могут быть определены без экспериментов по дисперсии.

Поток ЗВ состоит из отдельных траекторий частиц, которые не зависят от расчетной сетки, но следует иметь в виду, что модель по-прежнему зависит от нее, так как: стохастическое дифференциальное уравнение, которое управляет эволюцией скорости частиц, обычно включает в себя средние характеристики потока, которые на практике предоставляются метеорологическим препроцессором или прямым расчетом уравнений вычислительной гидродинамики.

Модель Эйлера. Модель Эйлера основана на численном решении усредненного по времени уравнения переноса, учитывающего конвекцию и диффузию ЗВ (4) путем его дискретизации во времени и пространстве:

$$\frac{\partial \langle c \rangle}{\partial t} + \langle U_i \rangle \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D \frac{\partial \langle c \rangle}{\partial x_j} - \langle \tilde{U}_i, \tilde{c} \rangle \right) + \langle S \rangle \quad (4)$$

где символ \sim – обозначение флуктуационной части;

U_i – скорость ветра вдоль оси i ; D – коэффициент диффузии, S – функция источника.

Данная модель может использовать нестационарный источник с учетом траектории его движения. К недостаткам данного подхода, применительно к задаче распространения ЗВ от ВС, можно отнести отсутствие учета турбулентности струи газозвоздушной смеси (далее ГВС), а также эмпирические соотношения для расчета химических реакций.

Гибридные модели: CALPUFF & HYSPLIT и GRAL. Эти модели не получили широкого распространения. Модель CALPUFF (USA) используется в научных и нормативных целях [7]. Одной из самых популярных гибридных моделей рассеивания является HYSPLIT, разработанная лабораторией NOAA AirResources. HYSPLIT использовался в многочисленных исследованиях для оценки последствий аварийного выброса или определения источников загрязнения [8].

Модель GRAL (Австрия) – это гибридная модель Эйлера-Лагранжа, разработанная для моделирования дисперсии инертных соединений в неоднородных ветровых полях. Одним из ограничений является то, что модель не может учитывать какие-либо химические реакции частиц (например, нитратов аммония, сульфатов аммония). Модель рассчитывает концентрации от 10 минут до 1 часа для линейных и точечных источников, а также может быть использована для сложной местности [9].

Гибридные модели используют лагранжев подход вблизи источника и интерполируют поле концентраций на сетку Эйлера, для последующего выполнения крупномасштабного моделирования по Эйлеру.

Модели вычислительной гидродинамики. Модели вычислительной гидродинамики (CFD) обеспечивают комплексный анализ потока жидкости, основанный на сохранении массы и количества движения, путем решения уравнения Навье-Стокса, что дает возможность провести моделирование всех влияющих на рассеивание ЗВ факторов и отобразить предполагаемую картину распространения ЗВ. Они особенно полезны для прогнозирования дисперсии газов или аэрозолей в атмосфере, в городских районах или вокруг промышленных объектов, где потоки и

турбулентность в значительной степени зависят от окружающей среды, зданий и, следовательно, в значительной степени неоднородны и неустойчивы.

Основные выводы о реализуемых моделях атмосферной дисперсии

В реализуемых сегодня моделях используются разные типы методологий моделирования дисперсии. Гауссова формулировка лагранжевого подхода с подвижной осью координат, которая движется со средней скоростью ветра, используется чаще, чем любой другой подход. Этот подход подразумевает, что целостность участка поддерживается в разумных пределах в течение всего времени моделирования модели и предполагает, что горизонтальный сдвиг ветра, горизонтальная турбулентная диффузия и вертикальный адвективный перенос незначительны.

Эйлеров подход с неподвижной системой координат применяет приближенное решение определяющих уравнений сохранения массы с использованием упрощающих допущений, которые связывают турбулентные потоки с градиентами концентрации путем включения члена вихревой диффузии. Этот подход используется для широко или равномерно распределенных загрязнителей, где отдельные крупные шлейфы, как, например, струя двигателя ВС, не являются доминирующими.

Модели Гаусса были проверены на широком диапазоне экспериментальных данных и могут моделировать атмосферную дисперсию при крайне низких вычислительных затратах. Они адаптированы для точечных, линейных и площадных источников и не могут применяться в условиях слабого ветра, а также при сложной топографии. Тем не менее, при верном подборе эмпирических параметров, они могут учитывать большое количество атмосферных явлений, таких как диффузия, эффект подъема шлейфа, влажное и сухое осаждение ЗВ и т.д. Несмотря на это, описанные выше ограничения не позволяют использовать модель Гаусса и ее модификации в случае с расчетом ЗВ от ВС для аэродрома и близлежащей территории. Однако гауссовы модели применяются из-за простоты использования и минимальных требуемых вычислительных мощностей.

Модель дисперсии Лагранжа имеет более широкий диапазон применимости, чем модель Гаусса. В отличие от гауссовых моделей, которые основаны на аналитическом решении классического дисперсионного уравнения, и моделей Эйлера, которые решают это уравнение численно, модели лагранжевых частиц моделируют сам процесс переноса. Хотя результаты лагранжевой модели более приемлемы, чем гауссовы модели в случае с распространением ЗВ от ВС, они уступают моделям вычислительной гидродинамики (CFD), основанным на численном решении уравнения Навье – Стокса.

Обзор расчетных моделей оценки качества воздуха вблизи аэропортов

Комитетом по охране окружающей среды (КАЕП) ИКАО в 2016 году представлены различные расчетные модели оценки качества воздуха вблизи аэропортов, прошедшие верификацию группы моделирования КАЕП: ADMS-Airport, AEDT / EDMS, LASPORT, ALAQS-AV, PEGAS [10].

ADMS-Airport. Британская модель ADMS-Airport [11] – это усовершенствованная модель гауссовой дисперсии. Подъем шлейфа моделируется с помощью интегральной модели, а влияние рельефа моделируется с помощью решения Фурье линеаризованных уравнений потока. Моделирование нестационарных выбросов производится с помощью шлейфа Гаусса, описанного выше, причем траектории отдельных шлейфов моделируются в Лагранжевом смысле. ADMS-Airport явно моделирует химический состав NO₂ / NO / O₃, используя набор реакций. Можно непосредственно моделировать влияние изменений первичного NO₂ и фоновое озона на качество местного воздуха.

EDMS, & AEDT (EPA, USA). В 2015 г расчетная модель EDMS была заменена на AEDT. AEDT – это программная система, моделирующая характеристики ВС в пространстве и

времени, способная оценивать шум, расход топлива, а также рассеяние ЗВ. Для моделирования рассеивания ЗВ AEDT использует нормативную модель (AERMOD, EPA/USA). Траектория самолета разбивается на сегменты, каждый из которых рассчитывается как площадной источник ЗВ в модели AERMOD [12].

LASPORT & ALAQS-AV. Модель LASPORT была разработана в 2002 году по заказу Немецкой ассоциации аэропортов (ADV). Применялась для оценки местного качества воздуха в нескольких европейских аэропортах (например, Дюссельдорфе, Франкфурте, Хитроу, Цюрихе). Для расчета дисперсии используется Лагранжева модель дисперсии LASAT.

Модель дисперсии LASAT рассчитывает дисперсию ЗВ в нижних слоях атмосферы (до высот 2000 м), как в местном, так и в региональном масштабе (до расстояний около 150 км) [13]. Наличие метеорологического препроцессора позволяет выполнять расчеты рассеивания с учетом как профиля местности, так и наличия зданий. LASAT моделирует сухое и влажное осаждение ЗВ, осаждение тяжелых аэрозолей, химические превращения. Требуемые входные данные для модели LASAT – скорость и направление ветра, а также класс устойчивости (Клаг-Манье). Концентрации рассчитываются на трехмерной сетке с пространственным разрешением 5 м.

Источники выбросов определяются в виде точечных, линейных, площадных или объемных источников с динамикой, зависящей от источника (импульс на выходе, турбулентность, подъем шлейфа). Следы веществ, для которых указаны значения выбросов по умолчанию: NO_x, HC, Бензол, CO, SO_x, CO₂ и PM₁₀. При вычислении выбросов ЗВ каждое ВС моделируется движущимся объемным источником с динамикой выбросов, изменяющимися во времени в соответствии с текущим сегментом ВПЦ.

Все вышеперечисленные модели не моделируют струю (струи), а рассматривают ВС как источники движущихся струй, с их подразделением на «категории моделирования самолетов» [3]. Отнесение самолетов к конкретной категории позволяет указать характеристики развития объемного шлейфа для конкретного самолета или группы самолетов, что включает в себя расположение выхлопных газов относительно самолета, скорость самолета в конкретном режиме, температуру выхлопных газов двигателя, скорость и диаметр шлейфа. Например, в программе/модели расчета концентраций EDMS 3.1 пользователь может указать начальные коэффициенты дисперсии воздушного судна в пределах допустимого диапазона взлетной эмиссии ВС для трех категорий размеров: тяжелых, больших и малых ВС. В табл. 1 ниже перечислены значения по умолчанию и диапазоны коэффициентов дисперсии воздушных судов для каждой из трех категорий размеров ВС.

Таблица 1

Диапазоны коэффициентов дисперсии по категориям размеров воздушных судов

Категория	Параметр	Значения коэффициентов дисперсии		
		Минимальное	Максимальное	По умолчанию
тяжелый	длина	20,0	35,0	25
	высота	5,4	9,0	7
большой	длина	6,5	22,0	15
	высота	2,3	6,4	4
малый	длина	3,1	10,4	6
	высота	0,8	3,5	2

PEGAS 1.2 (Россия) [14]. Модель была разработана в 2009 году с использованием усовершенствованной модели гауссовой дисперсии и ряда уравнений вычислительной гидродинамики: уравнения неразрывности, сохранения количества движения, температуры,

концентрации и уравнение состояния среды для решения двумерной задачи о затопленной струе, когда реактивная струя двигателя и атмосферный воздух смешиваются в начальном сечении. Модель турбулентности подзадачи основана на предположении о длине смешения Прандтля.

В целях оценки точности расчетов концентраций были проведены натурные замеры концентраций ЗВ в реальных условиях эксплуатации аэропорта Внуково [15]. Из приведенных в табл. 2 результатов расчета концентраций по некоторым типам ВС видно, что программное обеспечение, реализующее модель расчета струи авиационного двигателя обладает достаточной точностью для оценки загрязнения.

Таблица 2

Сравнение результатов расчетов с осредненными результатами измерений концентраций ЗВ

Тип ВС	Тип авиационного двигателя	Средняя концентрация NO ₂ за 1 мин, мкг/м ³		
		Измерение	Расчет	Погрешность
Boeing 737-300	CFM56-3B-1	38,6	37,2	3,63%
Airbus 320	CFM56-3A1	31,2	34,5	10,58%
Ту-134	Д30-II серии	45,6	43,7	4,17%
Ту-154М	Д30КУ-154	44,2	48,4	9,50%

PolEmiCa (Украина). Модель построена на основе эйлера подхода к моделированию загрязнения атмосферного воздуха точечными, линейными и площадными источниками [16]. В 2012 году в аэропорту Борисполь с участием одного из авторов были проведены совместные экспериментальные исследования НАУ (Украина), ЦЭБ ГА (Россия) и Бергише Университет (Германия) по измерению концентрации загрязнения воздуха выбросами ЗВ при летной эксплуатации ВС. Результаты были использованы для уточнения модели *PolEmiCa* и *Pegas*. В 2020 году процесс верификации модели *PolEmiCa* группой моделирования КАЕП ИКАО завершен.

ГГО им. Воейкова (Россия). Модели расчетных методик в сборнике [17] построены на основе эйлера подхода к моделированию загрязнения атмосферного воздуха. Рекомендуется их использование для расчета рассеяния от авиадвигателей. При этом процесс распространения ЗВ от ВС описывается неверно, так как применяется оценка движущегося точечного пассивного наземного источника, что не может быть применимо к оценке загрязнения приземного слоя атмосферы от скоростного высокотемпературного диффузионного источника, а определение температурного перегрева с учетом тепловой мощности используется для точечных, наземных источников (газовая горелка). По этой причине проведение расчетов концентрации ЗВ от струи авиадвигателей по изложенной методике не может быть осуществлено.

Система уравнений для точного решения задачи расчета загрязнения воздуха от струи газозвдушной смеси с применением моделей вычислительной гидродинамики

Чтобы получить информацию о распространении ЗВ на территории аэродрома и за его пределами необходимо провести расчет истечения струй с учетом массовых долей ЗВ, полученных при сгорании авиатоплива, и с их участием в возможных химических реакциях с кислородом воздуха. Данные вихревые образования не являются симметричными, что сказывается на распространении ЗВ, полученных в результате сгорания топлива, и на образовании и распределении продуктов их реакций с воздухом. Также требуется учет экранного эффекта зданий, сооружений и отражающей поверхности ВПП, скорости газозвдушного потока с учетом влияния окружающей среды.

Для точного решения задачи расчета загрязнения воздуха от струи газозвдушной смеси при работе двигателей воздушного судна предлагается использовать основные соотношения уравнений вычислительной гидродинамики (CFD), в виде решения приведенной ниже системы уравнений: непрерывности (5), момента (6), смеси с N компонентами (7), энергии (8) и состояния (9):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} = \frac{-\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau'_{ij} - \tau_{ij}^{sgs}) \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho Y_m}{\partial t} + \frac{\partial \rho \tilde{u}_j Y_m}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho D \frac{\partial Y_m}{\partial x_j} - \tau_{\phi}^{sgs} \right), m = 1..N \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\rho \tilde{E} + P) \tilde{u}_j \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j} + \tilde{u}_j \tau'_{ij} - H^{sgs} - \sigma^{sgs} \right) \quad (8)$$

$$\dot{P} = \rho R (\tilde{Y}_m) \tilde{T} \quad (9)$$

где \sim означает *Favre* фильтрацию, $'$ – пространственно-временная фильтрация;
 ρ – плотность; P – давление; τ'_{ij} – тензор вязких напряжений, Y_m – массовая доля компонента;

$D = \mu / \rho S_{sc}$ – коэффициент диффузии, где $\mu = (A_s \sqrt{T}) / (1 + Ts/T)$ – молекулярная вязкость, согласно закону *Sutherland's* и S_{sc} – коэффициент Шмидта.

$\tilde{E} = \tilde{e} + 1/2 (\tilde{u}_j^2) + k^{sgs}$ – кинетическая энергия, $\lambda = \mu C_p / Pr$ – молекулярная теплопроводность, Pr – коэффициент Прандтля, C_p – изобарическая теплоемкость.

Все переменные, помеченные индексом *sgs*, должны быть замкнуты, в зависимости от выбранной модели турбулентности. Например, *k-e*, *k-w*, *Smagorinsky* и т.д. [18]. Учитывая высокую скорость и температуру истекающих струй, рассматривается движение вязкого, сжимаемого газа, в качестве модели обычно выбирают турбулентности с использованием комбинации *k- ω* и *k- ϵ* – модель *SST k- ω* . Особо сложные случаи могут быть рассмотрены с использованием метода моделирования крупных уровней (*LES*).

К недостаткам предложения стоит отнести высокие вычислительные затраты, однако благодаря достижениям в вычислительной технике, такие расчеты уже могут проводиться весьма быстро, используя параллелизацию на графических процессорах (*GPU*).

Выводы

Представленные подходы для оценки местного качества воздуха в аэропортах, основанные на моделировании задачи расчета загрязнения воздуха от реактивных двигателей воздушного судна с помощью упрощенных моделей описания физических процессов точечного или площадного источников, основанных на эмпирических соотношениях, без учета воздействия струй друг на друга и протекания химических реакций, когда турбулентный воздушный поток от двигателей ВС не может быть адекватно описан в рамках представленных моделей и делает возможным получение лишь приблизительного расчета концентраций ЗВ.

Для точного решения задачи расчета загрязнения воздуха от струи газовой смеси при работе двигателей воздушного судна предлагается использовать основные соотношения уравнений вычислительной гидродинамики (*CFD*) в виде решения системы уравнений: непрерывности, момента, смеси с N компонентами, энергии и состояния.

ЛИТЕРАТУРА

1. Aviation And The Environment. Airport Operations and Future Growth Present Environmental Challenges, GAO, 2000, 100 p.
2. Картышев О.А., Кирюшина Н.К., Пинигин М.А. Предложения по оценке ущерба здоровью человека от воздействия авиационного шума // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2020. № 31. С. 54–65.
3. Doc 9889, Руководство по качеству воздуха в аэропортах. ИКАО, 2011, URL: https://www.icao.int/publications/Documents/9889_cons_en.pdf. С. 1–210.

4. Bogacz R., Brown E., Moehlis J., Holmes P., & Cohen, J. D. (2006). The physics of optimal decision making: A formal analysis of models of performance in two-alternative forced-choice tasks. *Psychological Review*, 2006, 113(4), pp. 70–76.
5. E. Murphy-Klimova, B. E. A. Fisher, R. Sokhi. Treatment of Urban Areas Within A Regional Transport Model of Sulphur and Nitrogen Oxides, 1998, *Urban Air Quality: Monitoring and Modelling*, pp. 213–224.
6. Minier J.-P. On Lagrangian stochastic methods for turbulent polydisperse two-phase reactive flows. *Prog. Energy Combust. Sci.* 50, 2015, pp. 1–62.
7. Ghannam K., El-Fadel M., Emissions characterization and regulatory compliance at an industrial complex: An integrated MM5/CALPUFF approach, *Atmos. Environ.*, 69, 2013, pp.156–169.
8. Yunfeng Ma, Maibo Wang, Shuai Wang, Yue Wang, Lei Feng & Kaiyu Wu. Air pollutant emission characteristics and HYSPLIT model analysis during heating period in Shenyang, China. *Environmental Monitoring and Assessment* volume 193, 2021, Article number: 9.
9. Oettl D., Uhmer U., Development and evaluation of GRAL-C dispersion model, a hybrid Eulerian-Lagrangian approach capturing NO-NO₂-O₃ chemistry, *Atmos. Environ.*, 45, 2011, pp. 839–847.
10. Doc 10069, CAEP/10, ICAO. Доклад десятого совещания Комитета по охране окружающей среды от воздействия авиации. Приложение А. 2016. С. 68–69.
11. Carruthers, D., Holroyd, R., Hunt, J., Weng, W., et.al. F.: UK–ADMS: A new approach to modelling dispersion in the earth’s atmospheric boundary layer. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.* 5, 1994, pp. 139–153.
12. Техническое руководство по авиационному средству проектирования окружающей среды (AEDT), версия 3с. Март 2020. URL: http://aedt.faa.gov/documents/AEDT3c_TechManual.pdf (дата обращения 05/03/2021).
13. Описание модели LASAT. URL: <https://www.janicke.de> (дата обращения 05/03/2021).
14. Восьмое совещание Группы по моделированию и базам данных (ЦПТ) CAEP/9, Париж, Франция, 17–19 октября 2012 г. URL: <https://favt.gov.ru/dejatelnost-mezhdunarodnaja-dejatelnost-ikao/>
15. Картышев О.А. Новые методические подходы по установлению размеров санитарно-защитной зоны и санитарных разрывов аэропортов гражданской авиации // *Гигиена и санитария*. 2013. № 1. С. 89–92.
16. Запорожец О. POLEMICA – инструмент для оценки загрязнения атмосферного воздуха и выбросов авиационных двигателей в аэропортах / О. Запорожец, К. Синило // Второй Всемирный конгресс «Авиация в XXI веке». Киев: Национальный авиационный университет. 2005. С. 4.22–4.28.
17. Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе. Россия. 2017. Утверждены приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 6 июня 2017 года № 273. С. 1–116.
18. Garnier E, Adams N, Sagaut P. Large eddy simulation for compressible flows. Springer Science+ & Business Media, 2009. С. 1–276.

REFERENCES

1. Aviation And The Environment. Airport Operations and Future Growth Present Environmental Challenges, GAO, 2000, pp. 1–105.
2. Kartyshev O.A., Kiryushina N.K., Pinigin P.A. Proposals for assessing damage to human health from the effects of aircraft noise. *Nauchnij vestnik GosNII GA = Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2020, no. 31, pp. 54–65. (In Russian).
3. Doc 9889, Airport Air Quality Manual. ICAO, 2011. Available at: https://www.icao.int/publications/Documents/9889_cons_en.pdf, pp. 1–210.
4. Bogacz R., Brown E., Moehlis J., Holmes P., & Cohen, J. D. The physics of optimal decision making: A formal analysis of models of performance in two-alternative forced-choice tasks. *Psychological Review*, 2006, 113(4), pp. 70–76.
5. E. Murphy-Klimova, B. E. A. Fisher, R. Sokhi. Treatment of Urban Areas Within A Regional Transport Model of Sulphur and Nitrogen Oxides, 1998, *Urban Air Quality: Monitoring and Modelling*, pp. 213–224.

6. Minier J.-P. On Lagrangian stochastic methods for turbulent polydisperse two-phase reactive flows. *Prog. Energy Combust. Sci.* 50, 2015, pp. 1–62.
7. Ghannam K., El-Fadel M., Emissions characterization and regulatory compliance at an industrial complex: An integrated MM5/CALPUFF approach, *Atmos. Environ.*, 69, 2013, pp.156–169.
8. Yunfeng Ma, Maibo Wang, Shuai Wang, Yue Wang, Lei Feng & Kaiyu Wu. Air pollutant emission characteristics and HYSPLIT model analysis during heating period in Shenyang, China. *Environmental Monitoring and Assessment* volume 193, 2021, Article number: 9.
9. Oettl D., Uhmer U., Development and evaluation of GRAL-C dispersion model, a hybrid Eulerian-Lagrangian approach capturing NO-NO₂-O₃ chemistry, *Atmos. Environ.*, 45, 2011, pp. 839–847.
10. Doc 10069, CAEP / 10, ICAO. Report of the tenth meeting of the Committee on Aviation Environmental Protection. Appendix A., 2016, pp. 68–69.
11. Carruthers, D., Holroyd, R., Hunt, J., Weng, W., et.al. F.: UK–ADMS: A new approach to modelling dispersion in the earth’s atmospheric boundary layer. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.* 5, 1994, pp. 139–153.
12. Aviation Environmental Design Tool (AEDT) Version 3c Technical Manual. March 2020, URL: http://aedt.faa.gov/documents/AEDT3c_TechManual.pdf, p. 263.
13. Description of the LASAT model. URL: <https://www.janicke.de> (Accessed: 05.03.2021)
14. CAEP/9 Modelling and Databases Group (MDG) Eighth Meeting, Paris, France, 17–19 October 2012, URL: <https://favt.gov.ru/dejatelnost-mezhdunarodnaja-dejatelnost-ikao/>.(Accessed: 05.03.2021)
15. Kartyshev O.A. New methodological approaches to determining the size of the hygiene and sanitation protection zone and sanitary breaks of civil aviation airports. *Gigiena i sanitariya = Hygiene and Sanitation*, 2013, no. 1, pp. 89–92. (In Russian).
16. Zaporozhets O. Polemica – tool for air pollution and aircraft engine emission assessment in airport / O. Zaporozhets, K. Synylo. The Second World Congress «Aviation in the XXI-st century». Kiev: National Aviation University, 2005, pp. 4.22–4.28. (In Russian).
17. Methods for calculating the dispersion of emissions of harmful (polluting) substances in the air. Russia, 2017. Approved by order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation dated June 6, 2017, № 273, pp.1–116. (In Russian).
18. Garnier E, Adams N, Sagaut P. Large eddy simulation for compressible flows. Springer Science& Business Media, 2009, pp. 1–276.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Картышев Олег Алексеевич, кандидат технических наук, заведующий испытательной лабораторией, ООО «Центр экологической безопасности гражданской авиации», ул. Красноказарменная, 14А, корп. 2, Москва, Российская Федерация, 111250; e-mail: oa_kartyshev@mail.ru.

Леонов Владимир Юрьевич, магистр физики, инженер, ООО «Центр экологической безопасности гражданской авиации», ул. Красноказарменная, 14А, корп. 2, Москва, Российская Федерация, 111250; e-mail: delkow@gmail.com.

ABOUT THE AUTHORS

Kartyshev Oleg A., Candidate of Technical Sciences, Head of the Testing Laboratory, LLC Center for Environmental Safety of Civil Aviation, Krasnokazarmennaya Street, 14A, building 2, 111250 Moscow, Russian Federation; e-mail: oa_kartyshev@mail.ru.

Leonov Vladimir Y., Master of Physics, Engineer, Center for Environmental Safety of Civil Aviation LLC, Krasnokazarmennaya Street, 14A, building 2, 111250 Moscow, Russian Federation; e-mail: delkow@gmail.com.