

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ
С ВОЗДУХОМ ЗА СРЕЗОМ СОПЕЛ ДВИГАТЕЛЕЙ САМОЛЕТА**

А. О. Турчинович

Новосибирский государственный технический университет
Российская Федерация, 630073, г. Новосибирск, просп. Карла Маркса, 20
E-mail: golubevaa@ngs.ru

Одним из важных этапов эксплуатации самолетов является гонка двигателей – проверка работоспособности силовых установок летательных аппаратов на специально оборудованных газоотбойниками площадках. Продолжительность данного этапа зависит от двигателей, установленных на самолетах, и может достигать 30 минут, как, например, для рассматриваемого в статье самолета Ан-12. При этом загрязняющие вещества, образующиеся в результате сгорания топлива, оседают на территории места для опробования двигателей и наносят значительный урон окружающей среде.

Целью настоящего исследования является разработка модели для анализа поведения струй выхлопных газов при столкновении с газоотбойником и анализа возможных химических реакций продуктов сгорания топлива с кислородом воздуха.

Качественный и количественный результат получен путем математического моделирования процесса опробования двигателей. В качестве геометрической модели принята двумерная модель самолета в плане и места для гонки. Кинематическая модель описывает максимальный режим рассматриваемого процесса, характеризующегося полным сгоранием топлива. Построены возможные химические реакции выхлопных газов с кислородом воздуха. Численная реализация данной задачи осуществлена с применением программного продукта Ansys Fluent. Результаты расчета показывают, что выхлопные газы при достижении газоотбойника претерпевают изменение траектории (рассеивание) и потерю скорости. При этом массовые доли продуктов сгорания топлива достигают своего максимального значения на срезе сопла, а массовые доли веществ, образующихся в ходе реакций с кислородом воздуха, – на границе струй с окружающей средой. Протекание реакций способствует увеличению области распространения загрязняющих веществ, полученных в результате окисления, по сравнению с веществами на срезе сопла.

Результаты анализа указанных процессов позволяют провести дальнейшее исследование, направленное на уменьшение загрязнения территорий для гонки двигателей. В последующем они могут быть применены на аэродромах, снабженных площадками для гонки двигателей, с целью снижения концентраций загрязнения на приаэродромных территориях.

Ключевые слова: самолет, гонка двигателей, газоотбойник, загрязняющие вещества, математическое моделирование, химические реакции.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 2, P. 438–447**SIMULATION OF CHEMICAL INTERACTION OF COMBUSTION PRODUCTS
WITH AIR BEHIND THE EXIT SECTION OF NOZZLES AIRCRAFT ENGINE**

A. O. Turchinovich

Novosibirsk State Technical University
20, K. Marksa Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation
E-mail: golubevaa@ngs.ru

One of important operational phases of planes is an engine runup – check of operability of engine aircraft power units on the platforms which are specially equipped with blast fence. Duration of this stage depends on the engines installed on planes and can reach 30 minutes, such as for the An-12 plane considered in this article. Thus the pollutants formed as the result of fuel combustion cover the territory of a place for approbation of engines and cause the considerable environmental loss.

Objective of this research is model construction for the analysis of behavior of streams of combustion gases at collision with a blast fence and the analysis of possible chemical reactions of products of fuel combustion with air oxygen.

In this work I have received the qualitative and quantitative results using mathematical model of operation process of approbation of engines. As geometrical model I accepted the two-dimensional model of the plane in the plan and places for engines runup. The kinematic model describes the maximal mode of the considered process characterized by the complete combustion of fuel. Possible chemical reactions of combustion gases with oxygen of air are constructed under this condition. This task is solved by means of the Ansys Fluent software product solved. Results of calculation show that combustion gases undergo change of a trajectory (dispelling) and loss of speed when interacting with of a blast fence. Thus, the mass fractions of products of fuel combustion reach its maximum number on a nozzle exit. And the mass fractions of the substances formed during reactions with air oxygen reach its maximum number on border of streams with environment. Reaction behavior also promotes increase in area of distribution of the pollutants received as a result of oxidation in comparison with the substances set on a nozzle exit.

The received analysis of processes allows to conduct the further research directed on decrease of pollution of territories for engine runup. In the future they can be applied in the airfields supplied with platforms for engine runup for the purpose of decrease of concentration of pollution concentration on aerodrome environs.

Keywords: airplane, engine runup, blast fence, pollutants, mathematical model operation, chemical reactions.

Введение. За последние десятилетия роль авиатранспортных перевозок существенно возросла. Доля воздушных судов только в международных пассажирских перевозках достигает 80 и 40 % от общего числа региональных и международных перевозок [1]. Также увеличивается потребность в авиатранспортировке грузов. Такое развитие неизбежно приводит к обострению экологической ситуации, особенно это проявляется на территориях, наиболее подверженных влиянию выхлопных газов, т. е. территориях аэропортов и аэродромов [2–4]. Движение воздушных судов состоит из этапов, регламентированных Международной организацией гражданской авиации (ИКАО) [5]:

- руление;
- взлет;
- набор высоты;
- заход на посадку;
- посадка;
- руление после посадки.

Указанные стадии взлетно-посадочного цикла были рассмотрены в статье [6].

В ходе эксплуатации самолетов можно выделить еще один немаловажный этап – гонку двигателей, при котором осуществляется запуск двигателей на различных режимах в рамках строго отведенного времени для проверки работоспособности силовых установок. На рис. 1 представлен пример графика опробования двигателей, соответствующие количественные характеристики приведены в табл. 1.

Гонка двигателей осуществляется на специально оборудованных газоотбойниками площадках. Газоотбойники являются преградой на пути выхлопных газов и могут иметь структуру сплошного, ячеистого забора или другие модификации (рис. 2).

Для различных самолетов (различных типов двигателей) продолжительность как отдельных режимов запуска двигателей, так и всего этапа гонки индивидуальна. Однако запуск двигателей на всех режимах, даже на непродолжительное время, оказывает существенное влияние на окружающую среду: повышение концентрации загрязняющих веществ, пыли, выгорание травы, шум. Все это крайне негативно сказывается на здоровье людей.

Чтобы уменьшить отрицательное воздействие, необходимо подробно рассмотреть данный процесс с учетом химической активности продуктов сгорания

авиатоплива и их взаимодействия с окружающей средой.

Целью исследования является разработка модели для расчета распространения загрязнений от авиационных двигателей на территории, предназначенной для гонки, с учетом возможных химических реакций выхлопных газов с воздухом, а также исследование поведения струй при столкновении с газоотбойником.

Постановка задачи. Рассматривается максимальный режим для этапа гонки двигателей самолета Ан-12 при нормальном атмосферном давлении (нормальных погодных условиях) и встречном ветре 6 м/с. Схема для расположения самолета относительно газоотбойника приведена на рис. 3.

На самолете Ан-12 установлены двигатели АИ-20 [7], режимы работы которых приведены в табл. 1 [8]. Необходимой характеристикой для оценки уровня загрязнения территорий от двигателей воздушных судов является индекс эмиссии – количество загрязняющего вещества (ЗВ), получающегося при сгорании килограмма топлива, в граммах. В табл. 2 показаны индексы эмиссии для данного двигателя.

Структура потока вблизи самолета с работающими двигателями определяется химическим взаимодействием продуктов сгорания с компонентами воздуха и динамическим взаимодействием высокотемпературных и высокоскоростных струй с окружающей средой. Это приводит к образованию вихрей. Пространственная вихревая картина изменяется со временем, из чего следует необходимость численного моделирования нестационарной трехмерной задачи. Моделирование химических реакций само по себе является сложным, а в трехмерном случае это может стать невыполнимым. Тем не менее оценку основных процессов, реализующихся при обтекании газоотбойников загрязняющими веществами, возможно провести с помощью двумерного приближения в плоскости симметрии двигателей. Это позволит создать кинетическую модель и оценить уровень образования примесей, установить области, наиболее подверженные влиянию выхлопных газов. Решение задачи в двумерной постановке, возможно, позволит в дальнейшем перейти к детальному и качественному анализу в трехмерной нестационарной постановке с учетом химических реакций.

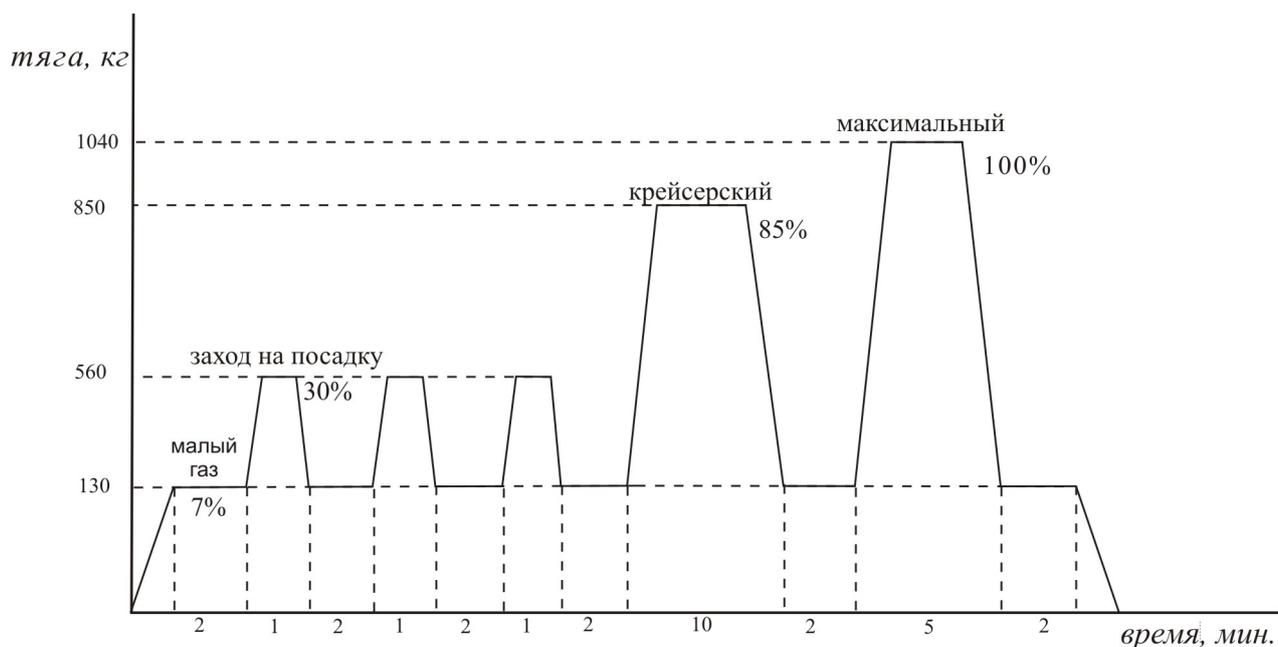


Рис. 1. График опробования двигателей

Таблица 1

Количественные характеристики этапа гонки двигателей

Режим гонки	Обороты, %	Время работы, мин	Часовой расход топлива, кг/ч
Максимальный	100	5	1040
Крейсерский	85–90	10	850
Заход на посадку	30	3	560
Малый газ	7	12	130

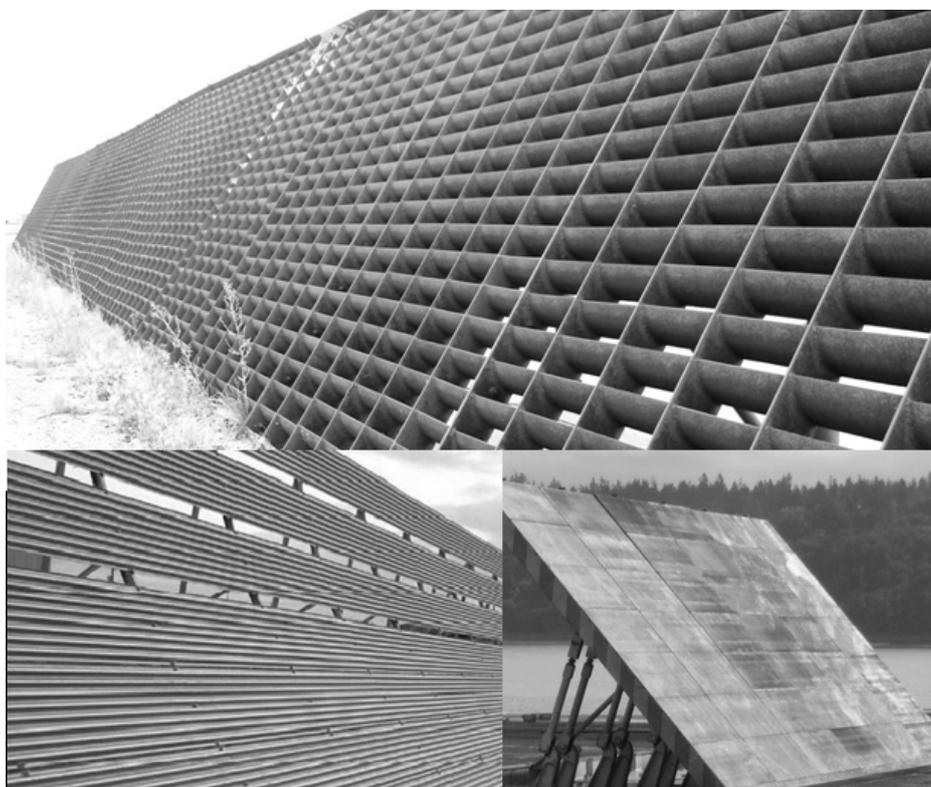


Рис. 2. Возможные модификации газотбойников

Место стоянки ВС для гонки двигателей

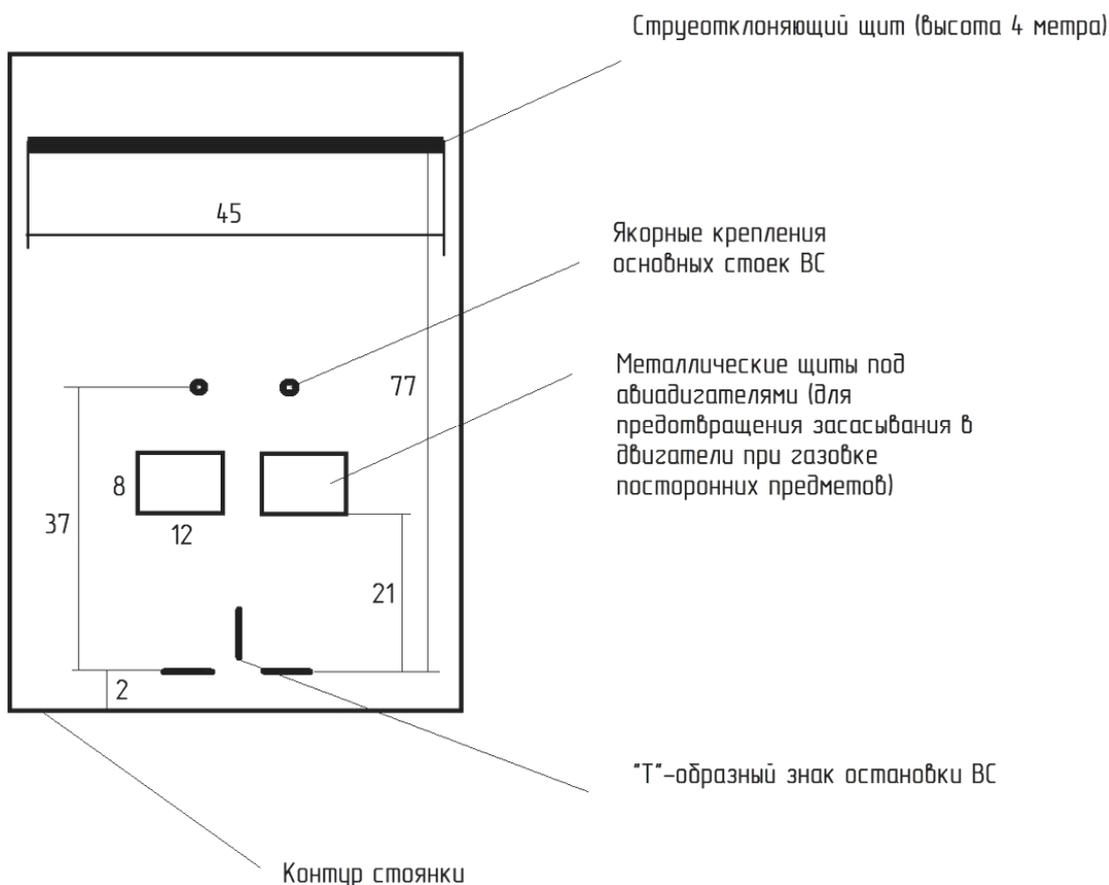


Рис. 3. Схема для расположения воздушного судна на месте для гонки двигателей

Таблица 2

Индексы эмиссии для различных режимов двигателя АИ-20

Этап	Индексы эмиссии, г/кг			
	Оксиды углерода CO	Углеводороды C _n H _m	Оксиды азота NO _x	Сажа
Максимальный режим	2,35	0	11,75	0,270
0,6 М	3,7	0	7,6	0,185
0,3 М	12,0	0	5,7	0,145
Крейсерский режим	7,7	0	6,6	0,154
Малый газ	77,3	12,2	2,04	0,104

Геометрическая модель представляет собой самолет Ан-12 в плане и газоотбойник, расположенные в соответствии с рис. 3.

Чтобы создать расчетную модель процессов, происходящих при выбранном этапе, обратимся к анализу топлива для самолета Ан-12 и оценим возможные химические реакции.

Для эксплуатации данных типов двигателей используется авиационное топливо ТС-1 [8]. В зависимости от химического состава и способа перегонки нефти в состав авиакеросина входят:

- предельные алифатические углеводороды – 20–60 %;
- нафтеновые – 20–50 %;
- бициклические ароматические – 5–25 %;

- непредельные – до 2 %;
- примеси сернистых, азотистых или кислородсодержащих соединений [9; 10].

Согласно [11], для топлива ТС-1 температура перегонки начинается со 150 °С, на рис. 4 представлена зависимость фракционного состава от температуры перегонки.

Для определенности примем следующий состав топлива:

- предельные алифатические углеводороды – алканы нормального и изостроения – 48 %;
- нафтеновые – 35 %;
- ароматические – 15 %;
- непредельные – 2 %.

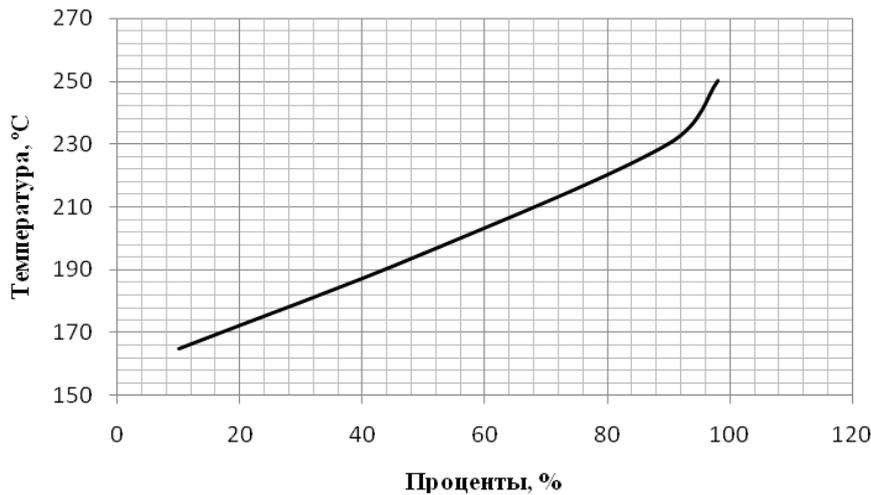


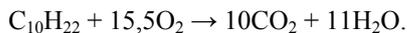
Рис. 4. Фракционный состав топлива ТС-1

Чтобы провести ориентировочный расчет ЗВ, образующихся при сгорании топлива, зададим условный состав топлива исходя из конкретных углеводородов, выкипающих в диапазоне от +150 до +250 °С.

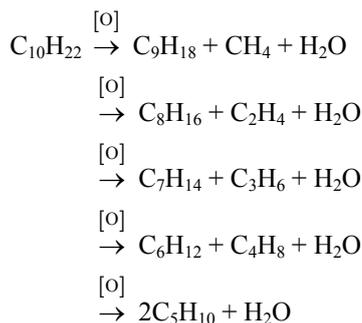
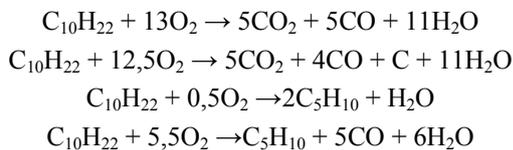
1. Нормальный алкан: декан $C_{10}H_{22}$, $t_{кип} = 174,1$ °С.
2. Изоалкан: 3-метилнонан $C_{10}H_{22}$ $(CH_3CH_2CH(CH_3)(CH_2)_5CH_3)$, $t_{кип} = 167,8$ °С.
3. Нафтеновые: циклодекан $C_{10}H_{20}$, $t_{кип} = 201$ °С.
4. Ароматические: изопропилбензол C_9H_{12} $(C_6H_5CH(CH_3)_2)$, $t_{кип} = 152,4$ °С.
5. Непредельные углеводороды: децен $C_{10}H_{20}$, $t_{кип} = 170,6$ °С.
6. Примесь сернистых соединений: тиофенол C_6H_5SH , $t_{кип} = 168,7$ °С.
7. Примесь кислородсодержащих соединений: фенол C_6H_5OH , $t_{кип} = 181,7$ °С.
8. Примесь азотсодержащих соединений: нитробензол $C_6H_5NO_2$, $t_{кип} = 210,9$ °С.

При работе двигателей происходит процесс горения смеси. Представим реакции горения для каждого подобранного вещества.

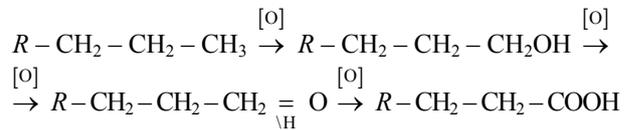
1. Вариант полного окисления для декана:



В случае если происходит неполное окисление, в результате реакции могут появиться монооксиды углерода, элементарный углерод или несгоревшие углеводороды:

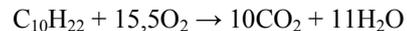


При неполном горении углеводородов возможно образование спиртов, альдегидов или кислот:



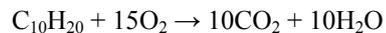
Однако наличие таких соединений в двигательной установке крайне нежелательно, поэтому образование данных продуктов сводится к минимальному, путем подбора состава топлива и конструкции самого двигателя. В связи с этим подобные реакции не рассматриваются.

2. Для изоалканов имеем аналогичное уравнение полного окисления:

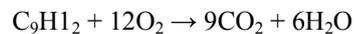


Неполное окисление точно также может дать в виде продуктов сгорания монооксид углерода, диоксид углерода и воду. Это справедливо для любых реакций горения углеводородов.

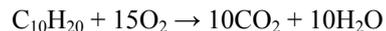
3. Для нафтеновых углеводородов имеем при полном горении:



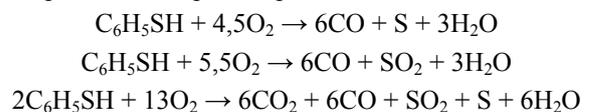
4. Для изопропилбензола реакция горения запишется в виде



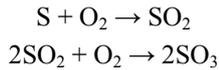
5. Для непредельных углеводородов в результате горения получим следующее соотношение углекислого газа и воды:



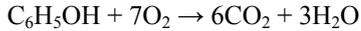
6. При горении сернистых соединений выделяется не только ди-, монооксид углерода и вода, но и оксиды серы, элементарная сера:



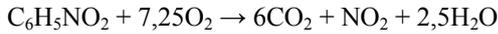
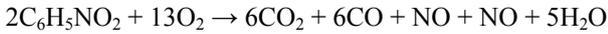
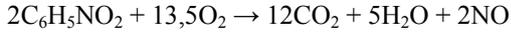
В присутствии кислорода воздуха и повышенных температур газовой смеси на выбросе из сопла возможно дальнейшее окисление серы:



7. При горении кислородсодержащих углеводородов получаем диоксид углерода и воду:



8. В ходе реакции горения нитробензола появляются оксиды азота, а также диоксид углерода и вода:



Появление других оксидов азота не рассматривается, поскольку это маловероятно.

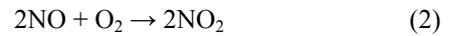
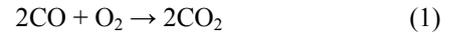
Подчеркнем, что реакция горения сопровождается разрушением углерод-углеродной связи и выделением большого количества энергии, поэтому мы не рассматриваем реакции окисления, в результате которых могут получиться спирты, альдегиды или кислоты.

Таким образом, в результате горения могут образоваться следующие соединения:

- монооксид углерода (CO);
- диоксид углерода (CO₂);
- монооксид азота (NO);
- диоксид азота (NO₂);
- элементарная сера (S);
- диоксид серы (SO₂);
- несгоревшие углеводороды (C_nH_m);
- сажа (C);
- вода (H₂O).

Несмотря на достаточно обширный состав выхлопных газов, нормами ИКАО регулируются только выбросы NO_x, CO, C_nH_m, сажи как наиболее вредных и преимущественных [5]. Остальные вещества выделяются в столь незначительных количествах, что их

концентрации не регламентируются. В связи с этим возможно следующее взаимодействие загрязняющих веществ, полученных в результате сгорания топлива, с кислородом воздуха:



Важными параметрами уравнений (1), (2) кроме стехиометрических коэффициентов являются энергия активации и предэкспоненциальный множитель, входящие в уравнение Аррениуса [12; 13]:

$$k = Ae^{-E/RT}, \quad (3)$$

где E – энергия активации; A – предэкспоненциальный множитель; k – константа скорости реакции; R – универсальная газовая постоянная; T – температура.

Согласно [12; 13] для реакции (1): $A = 3,5 \cdot 10^{14}$, $E = 2,1 \cdot 10^{-3}$ кДж/моль; согласно [12; 13] для реакции (2): $A = 1 \cdot 10^9$, $E = -4,7$ кДж/моль.

Таким образом, создана двумерная модель, позволяющая провести анализ распространения загрязняющих веществ из сопел двигателей и их взаимодействие с компонентами воздуха при различных режимах запуска силовых установок.

Численная реализация. Поставленная задача может быть решена с помощью программного продукта Ansys Fluent, который является мощным инструментом в вычислительной гидродинамике и большим плюсом которого является наличие возможности моделировать химические реакции [14; 15]. Созданную двумерную модель самолета в плане и области для гонки двигателей разобьем на конечные элементы, используя сеточный генератор ICEM. Регулярная сетка из прямоугольных элементов приведена на рис. 5 и состоит из 197 146 узлов (198 584 элемента).

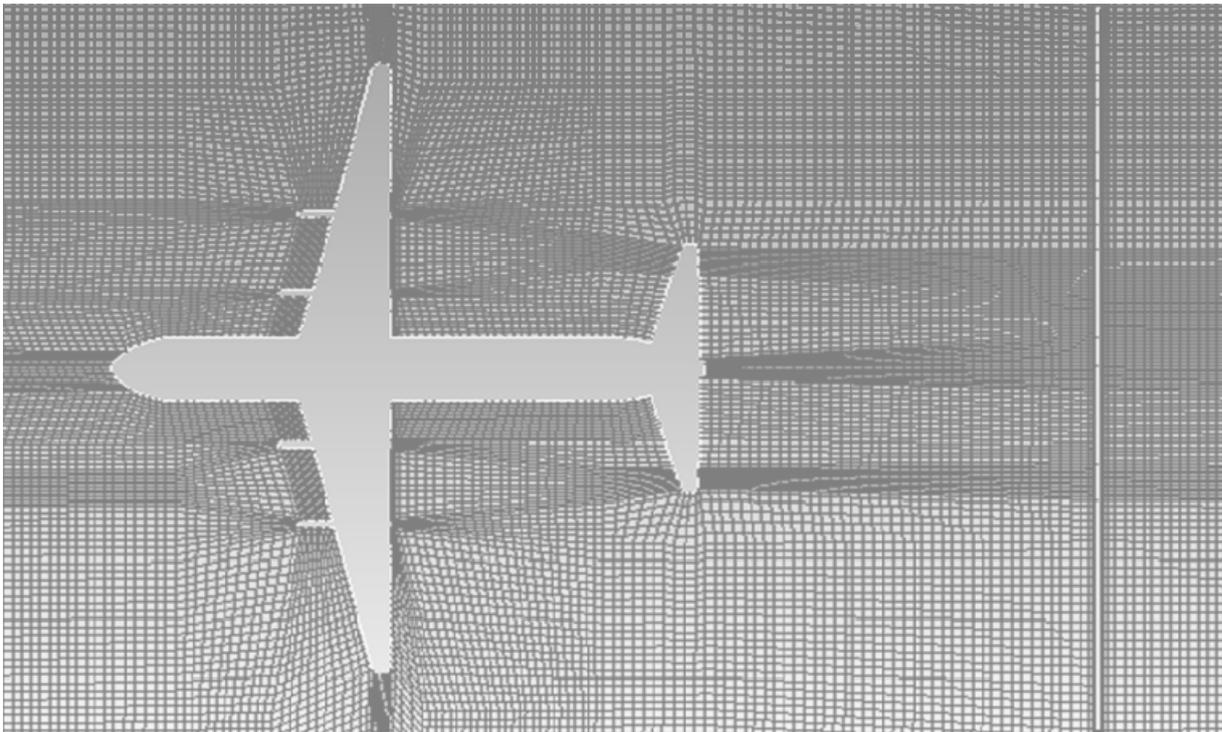


Рис. 5. Конечно-элементная модель Ан-12

Зададим глобальные настройки расчета. Рассмотрим стационарную задачу. В качестве решателя воспользуемся связанным решателем density-based. В общем случае он решает уравнения количества движения, уравнение состояния, уравнение энергии и уравнение переноса компонентов в виде единого связанного набора в векторной форме. После чего отдельно от связанного набора решаются уравнения дополнительных моделей, таких как уравнения моделей турбулентности.

Обязательной составляющей в настройках параметров является активация уравнения энергии. Среди вязких моделей выбрана модель турбулентности *k-omega standard*. Данная модель является одной из наиболее применимых, не требует ограничений параметров k и ω и чувствительна к граничным условиям во внешнем потоке.

Для того чтобы можно было учесть в расчетах химические реакции, воспользуемся опцией volumetric (объемные химические реакции) в разделе «Виды моделей» – species transport (перенос компонентов). Будем использовать модель конечной скорости химической реакции.

Опираясь на выбранную модель процессов, в качестве материала зададим смесь NO, NO₂, CO, сажи; выбросы C_nH_m для максимального режима тяги отсутствуют (см. табл. 2).

В разделе Reactions запишем реакции (1) и (2) и укажем соответствующие значения энергии активации, предэкспоненциального множителя и скорости реакций.

В качестве граничных условий приняты:

- на входной границе (Inlet): скорость набегающего потока, что соответствует скорости ветра, а также атмосферное давление, равное 101 325 Па; в качестве материала задаем массовые доли основных компонентов воздуха: O₂ – 0,23, N₂ – 0,77;

- боковая поверхность (Far-field): свободная граница – мягкие граничные условия, задаются давление в окружающей среде и скорость ветра; в качестве материала задаем массовые доли основных компонентов воздуха: O₂ – 0,23, N₂ – 0,77;

- условия на выходе из сопел (Nozzle exit): условия массового расхода (см. табл. 1) и давление на срезе сопла. Анализ возможных химических реакций показывает, что при горении нитробензола возможно образование продуктов сгорания в виде оксида азота. При этом диоксид азота может образовываться путем взаимодействия полученного оксида азота с кислородом воздуха – согласно уравнению (2). Основываясь на этом, рассмотрим случай, когда задается смесь CO, NO, C. Массовая доля каждого вещества определена согласно табл. 2 для максимального режима: NO – 0,8177, CO – 0,1635, сажа (C) – 0,0188.

- условия на выходной границе (outlet): нормальное атмосферное давление – 101 325 Па.

- условие на газотбойнике (wall) – непроницаемая стена.

Данную постановку задачи в решателе density-based будем решать с помощью неявной схемы решения. Для неявной схемы неизвестная переменная вычисляется в каждом узле путем деления известных

и неизвестных значений в соседних узлах. При этом будем использовать второй порядок точности.

При выборе неявной схемы решения в решателе density-based каждое уравнение в сочетании с дополнительными уравнениями линеаризуется неявно в отношении всех неизвестных в уравнении. Это приводит к системе с N уравнениями для каждого узла. С помощью многосеточного алгебраического решателя происходит линеаризация для всех N в каждом узле.

Тип потока выбран *Roe-FDS*. «Подход Роэ основан на квазилинейной форме уравнений Эйлера и предполагает построение некоторой матрицы, являющейся аналогом якобиана применительно к задаче о распаде разрыва. На матрицу налагается ряд условий, при которых задача становится гиперболической и разрешимой, а метод консервативным, и обеспечивается необходимая гладкость аппроксимации вектора потока при вариации состояний слева и справа» [15, с. 159].

Результаты моделирования. В результате расчета в стационарной постановке получены следующие результаты (рис. 6–8).

На рис. 6, а представлены линии тока. График наглядно иллюстрирует, что, несмотря на внешне симметричную задачу, поведение вихревых структур не является симметричными. Это объясняется тем, что дозвуковое течение характеризуется распространением возмущений в разные стороны, что и приводит к наличию асимметрии. Ввиду данного обстоятельства задача рассматривается в ее полной постановке.

На рис. 6, б приведено распределение скорости при выходе из сопел: черный цвет соответствует максимальной скорости, белый (светло-серый) – минимальной. Из рис. 6 видно, что максимальная скорость выхлопных газов достигается на срезе сопла и составляет 251 м/с, что не противоречит реальным скоростям на выходе из сопла для самолета Ан-12. При отдалении скорость постепенно уменьшается. Достигая хвоста самолета, струи огибают его; также наблюдается смещение струй от траектории первоначального движения за счет образования вихрей вдоль фюзеляжа (рис. 6, б). Далее на своем пути поток выхлопных газов встречает газотбойник, при столкновении с ним часть потока отклоняется в стороны, а часть огибает стоящую на пути преграду, при этом происходит потеря скорости струй.

На рис. 7, а приведено распределение угарного газа CO. Данное вещество задавалось в виде исходных данных, и максимальное значение достигается на срезе сопла, чему соответствует черная область на диаграмме – составляет 0,1635. Следует отметить, что несимметричность распределения ЗВ определена несимметричностью вихревых структур (рис. 6).

На рис. 7, б показано распределение углекислого газа CO₂. Данное вещество было получено в ходе химической реакции угарного газа и кислорода воздуха (уравнение (1)). Реакция (1) определяет конфигурацию распространения CO₂, которая больше соответствующей области CO. Максимальные массовые доли углекислого газа, равные 0,09345, находятся на границе с воздухом, т. е. протекание реакций происходит на отдалении от сопел двигателей. Картина распространения CO₂ также не является симметричной в силу особенностей вихревых структур.

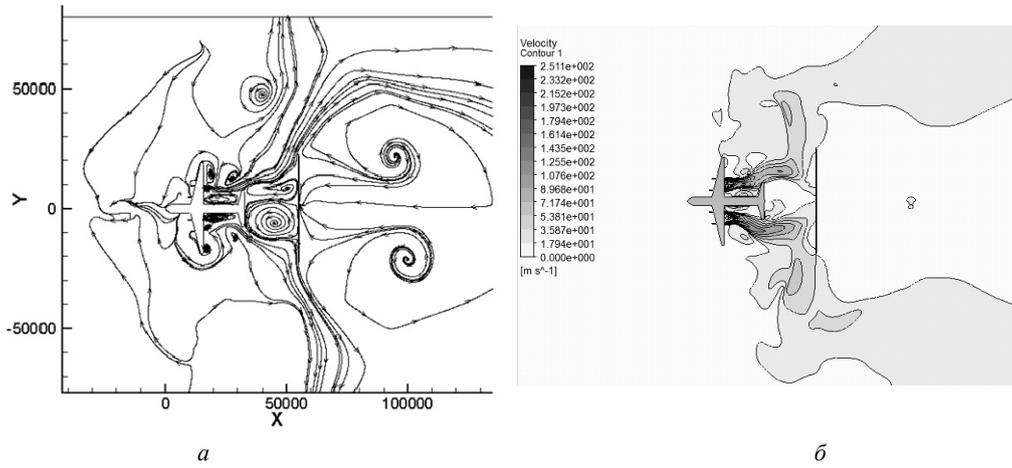


Рис. 6. Динамическая картина потока:
 а – график линий тока; б – распределение скорости

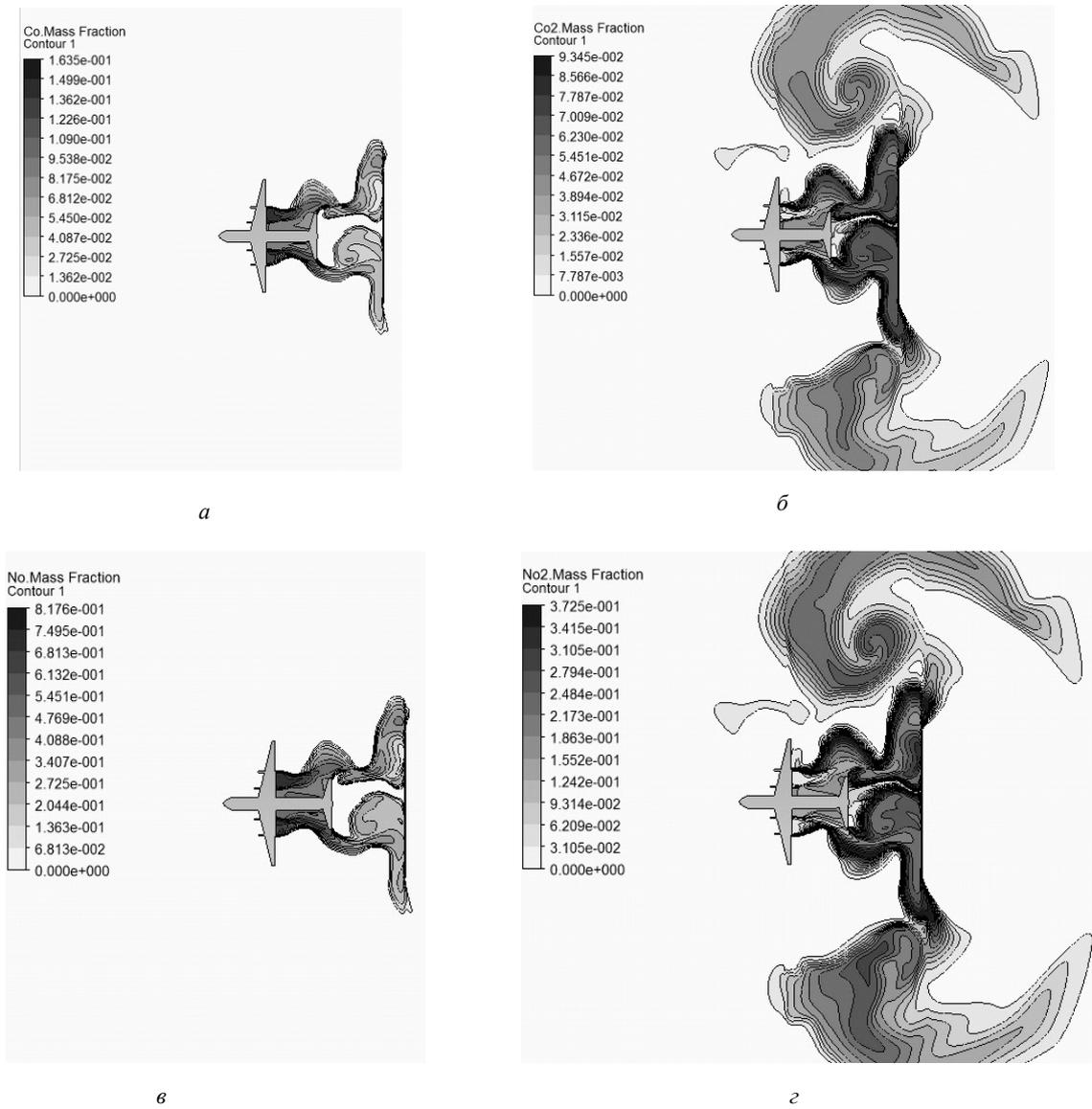


Рис. 7. Распространение загрязняющих веществ:
 а – угарного газа (CO); б – углекислого газа (CO₂); в – оксида азота (NO); г – диоксида азота (NO₂)

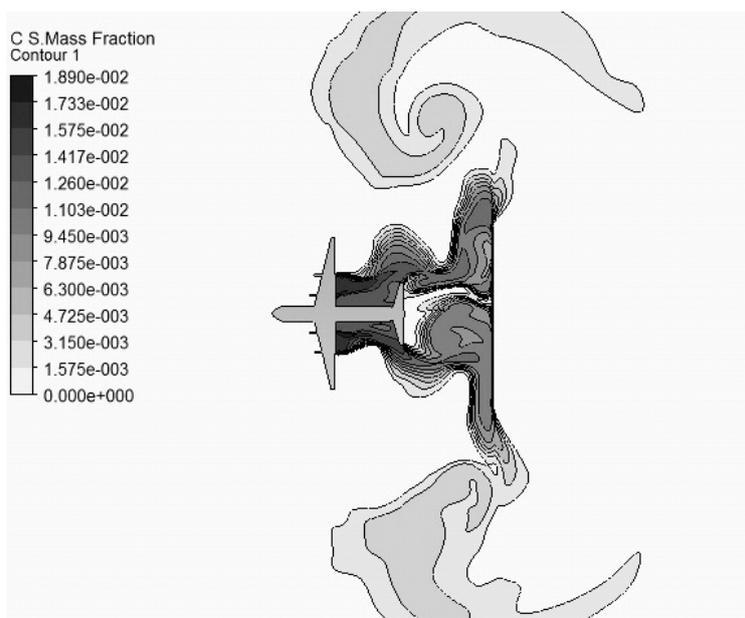


Рис. 8. Распространение сажи (С)

Аналогичный результат получен для реакции оксида азота с кислородом воздуха (уравнение (2)). Массовые доли оксида азота, который выступает в виде реагирующего вещества, достигают максимальных значений на выходе из двигателей и равны 0,8177. Отдаляясь от двигателя, происходит постепенное уменьшение этих значений (рис. 7, в). Продукт реакции – диоксида азота – имеет максимальную массовую концентрацию, равную 0,3725, на некотором расстоянии от сопел двигателя (рис. 7, г). Следует отметить несимметричность картины распространения ЗВ, что наблюдалось и в предыдущей реакции.

Оксиды углерода и азота являются исходными веществами и, вступая в химические реакции с компонентами воздуха, образуют углекислый газ и диоксид азота соответственно. Сажа является инертной и не реагирует с составляющими воздуха. Поэтому область распространения сажи отличается от полей концентраций угарного газа и оксида азота (рис. 8). Однако максимальное значение концентрации сажи, как и в случае с NO и CO, достигается на срезе сопел, что соответствует черному цвету на диаграмме – составляет 0,0189 (рис. 8).

Заключение. Эксплуатация воздушных судов помимо стандартного взлетно-посадочного цикла включает этап гонки двигателей, который состоит из этапов, соответствующих различным режимам тяги. Высокотемпературные и высокоскоростные струи, выходящие из сопел двигателей, при взаимодействии с окружающей средой приводят к образованию вихрей. Для детального анализа требуется рассматривать трехмерную, нестационарную задачу, однако оценку основных процессов, реализующихся при обтекании газотбойников загрязняющими веществами, возможно провести в двумерной постановке в плоскости симметрии двигателей. В настоящей статье рассмотрен максимальный режим этапа гонки, характеризующийся полным сгоранием топлива. Созданная двумерная модель самолета и места для опробования

двигателей, а также кинетическая модель позволяют в рамках данных допущений провести расчет химических реакций загрязняющих веществ с компонентами воздуха и проанализировать область их распространения. Из полученных результатов видно, что задача несимметрична за счет несимметричности вихрей. Данная особенность отражается в соответствующих распределениях скоростей и концентраций загрязняющих веществ. При этом загрязняющие вещества, которые задавались в качестве исходных данных, достигают максимальных массовых концентраций на срезе сопла, а продукты, полученные в результате химических реакций, имеют максимальные концентрации на некотором отдалении от сопел двигателей – на границе с воздухом.

Также стоит отметить, что ЗВ при выходе из сопел вначале огибают хвост самолета, а затем сталкиваются с газоотбойником. При столкновении происходит торможение частиц выхлопных газов и их рассеивание в области преграды.

Созданная модель и полученные первые результаты будут использоваться в дальнейших исследованиях, направленных на уменьшение концентрации выхлопных газов на территории для опробования двигателей, что особенно актуально для аэропортов и аэродромов.

Благодарности. За обсуждение кинетической модели выражаю благодарность к.г.-м.н., доценту Н. И. Ларичкиной и д.х.н., профессору М. Н. Тимофеевой кафедры инженерных проблем экологии факультета летательных аппаратов ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет».

Acknowledgments. I give thanks to Cand.Sc., Do-cent, N. I. Larichkina and Dr. Sc., professor M. N. Timofeeva, Department of Engineering Issues in Ecology of Aircraft Faculty of Federal State-Funded Educational Institution of Higher Professional Education Novosibirsk state technical university, for discussion of a kinetic model.

Библиографические ссылки

1. Ковалёв И. Авиационная наука: взгляд в будущее [Электронный ресурс] // Наука и жизнь. 2008. № 11. URL: <http://www.nkj.ru/archive/articles/14887/> (дата обращения: 06.01.2015).
2. Uliasz M., Stocker R. A., Pielke R. A. Regional modeling of air pollution transport in the southwestern United States. Environmental Modeling III / ed. P. Zannetti. Computational Mechanics Publications, 1996. Pp. 145–182.
3. Emissions and Dispersion Modeling System User's Manual. Prepared for Federal Aviation Administration Office of Environment and Energy Washington, DC Prepared by CSSI, Inc. Washington, 2013.
4. Barrett M. Aircraft, and the global environment // World Aerosp. Technol'92 : Int. Rev. Aerosp. Des. And Dev. London, 1992. Pp. 32–37.
5. Международные стандарты и рекомендуемая практика. Приложение 16 ИКАО. Т. 2. Эмиссия авиационных двигателей. 2008. 118 с.
6. Голубева А. О., Коротаева Т. А., Ларичкин В. В. Численный расчёт рассеивания загрязняющих веществ от эксплуатации самолётов на прилегающих к аэропортам и аэродромам территориях // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2014. № 1(22). С. 52–61.
7. Руководство по летной эксплуатации. Самолет Ан-12. М. : АСЦ ГосНИИ ГА, 2007. 506 с.
8. Авиационный турбовинтовой двигатель АИ-20. Инструкция по эксплуатации и техническому обслуживанию. Ростов н/Д. : Технолог, 2004. 414 с.
9. ТС-1 – Топливо самолетное [Электронный ресурс]. URL: <http://www.topreg.ru/slovar/ts-1-toplivo-samoletnoe> (дата обращения: 26.12.2014).
10. Аксенов А. Ф. Авиационные топлива, смазочные материалы и специальные жидкости. М. : Транспорт, 1970. 256 с.
11. ГОСТ 10227–86. Топливо для реактивных двигателей. М. : Изд-во стандартов, 2013. 10 с.
12. Мищенко К. П., Равдель А. А. Краткий справочник физико-химических величин. Химия, 1974. 200 с.
13. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. Топлива на основе кислорода / В. Е. Алемасов [и др.] // М., 1972. Т. 2. 256 с.
14. ANSYS FLUENT 14.0 Tutorial Guide. Изд-во ANSYS, Inc. Southpointe, 2011. 1146 с.
15. Волков К. Н. Разностные схемы расчета потоков повышенной разрешающей способности и их применение для решения задач газовой динамики // Вычислительные методы и программирование. 2005. Т. 6. С. 159.

References

1. Kovalev I. [Aviation science: prospecting]. *Nauka i zhizn'*. 2008, No. 11 (In Russ.). Available at: <http://www.nkj.ru/archive/articles/14887/> (accessed 06.01.2015).
2. Uliasz M., Stocker R. A., Pielke R. A. Regional modeling of air pollution transport in the southwestern United States. Environmental Modeling III, ed.

P. Zannetti, Computational Mechanics Publications. 1996, P. 145–182.

3. Emissions and Dispersion Modeling System User's Manual. Prepared for Federal Aviation Administration Office of Environment and Energy Washington, DC Prepared by CSSI, Inc., Washington, DC, June 2013.

4. Barrett M. Aircraft, and the global environment. "World Aerosp. Technol'92: Int. Rev. Aerosp. Des. And Dev." London, 1992, P. 32–37.

5. [The international standards and the recommended practice]. *Prilozhenie 16 ICAO, t. 2 "Emissiya aviatsionnykh dvigateley"* [Appendix 16 ICAO, Vol. 2 "Emission of aviation engines"]. 2008, 118 p.

6. Golubeva A. O., Korotaeva T. A., Larichkin V. V. [Numerical calculation of a dispelling of pollutants from operation of planes in territories, adjacent to the airports and airfields]. *Doklady Akademii nauk vysshey shkoly Rossiyskoy Federatsii*. 2014, No. 1(22), p. 52–61 (In Russ.).

7. *Rukovodstvo po letnoy ekspluatatsii. Samolet An-12* [Guide to flight operation. An-12 plane]. Moscow, ASC State scientific research institute of Civil aviation, 2007, 506 p.

8. *Aviatsionny turbovintovoy dvigatel' AI-20. Instruktsiya po ekspluatatsii i tekhnicheskomu obsluzhivaniyu* [Aviation turbo-propeller AI-20 engine. Maintenance instruction and to maintenance]. Rostov on Don, Tekhnolog Publ., 2004, 414 p.

9. *TS-1 – Toplivo samoletnoe* [TS-1 – Fuel plane] (In Russ.) Available at: <http://www.topreg.ru/slovar/ts-1-toplivo-samoletnoe> (accessed 26.12.2014).

10. Aksekov A. F. *Aviatsionnye topliva, smazochnye materialy i spetsial'nye zhidkosti* [Aviation fuels, lubricants and express liquids]. Moscow, Transport Publ., 1970, 256 p.

11. *GOST 10227-86. Toplivo dlya reaktivnykh dvigateley* [State Standard 10227-86. Jet aircraft fuel]. Moscow, Standartinform Publ., 2013, 10 p.

12. Mishchenko K. P., Ravdel' A. A. *Kratkiy spravochnik fiziko-khimicheskikh velichin* [Short critical tables]. Chemistry, 1974. 200 p.

13. Alemasov V. E., Dregalin A. F., Tishin A. P. *Termodinamicheskie i teplofizicheskie svoystva produktov sgoraniya. Topliva na osnove kisloroda* [Thermodynamic and thermal properties of products of combustion. Fuels on the basis of Oxygen]. Moscow. 1972, Vol. 2, 256 p.

14. ANSYS FLUENT 14.0 Tutorial Guide. Pupil. ANSYS, Inc. Southpointe. 2011, 1146 p.

15. Volkov K. N. [Difference schemes of calculation of streams of the increased resolving power and their application for problem solving of gas dynamics]. *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye*. 2005, Vol. 6, P. 159 (In Russ.).