

*На правах рукописи*



ТУРЧИНОВИЧ АННА ОЛЕГОВНА

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ  
ВЕЩЕСТВ ОТ ДВИГАТЕЛЕЙ САМОЛЕТОВ НА ЭТАПАХ ВЗЛЕТНО-  
ПОСАДОЧНОГО ЦИКЛА И ПРИ ГОНКЕ ДВИГАТЕЛЕЙ С УЧЁТОМ  
КИНЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ**

01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Новосибирск – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».

Научный руководитель:  
доктор физико-математических наук, доцент,  
Коротаева Татьяна Александровна.

Официальные оппоненты:  
Климова Екатерина Георгиевна, доктор физико-математических наук, доцент,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт  
вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук,  
центр мониторинга социально-экономических процессов и природной среды,  
старший научный сотрудник.

Шахов Валентин Гаврилович, кандидат технических наук, профессор,  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени  
академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)»,  
кафедра конструкции и проектирования летательных аппаратов, профессор.

Ведущая организация:  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования «Национальный исследовательский Томский государственный  
университет».

Защита состоится «29» января 2016 года в 14<sup>00</sup> часов на заседании  
диссертационного совета Д003.035.02 на базе ФГБУН Института теоретической и  
прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН по адресу: 630090, г.  
Новосибирск, ул. Институтская, 4/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБУН Института  
теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН  
[www.itam.nsc.ru](http://www.itam.nsc.ru).

Ваш отзыв на автореферат в 2-х экземплярах, заверенный печатью, просим  
выслать по адресу: 630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1, ИТПМ СО РАН,  
ученому секретарю диссертационного совета Д003.035.02.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

И.о. ученого секретаря  
диссертационного совета  
д.ф.-м.н.



С.А. Гапонов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы** обусловлена необходимостью повышения точности расчетов для определения территорий санитарно-защитных зон (СЗЗ) аэропортов и аэродромов в условиях современной ситуации, характеризующейся повышением количества выбросов загрязняющих веществ (ЗВ) в связи с увеличением объемов грузовых и пассажирских авиаперевозок. Так, современные крупнейшие международные аэропорты способны принимать более 1000 самолетов в день. И, несмотря на постоянно ужесточающиеся требования к выбросам от авиационных двигателей, происходит значительное загрязнение приаэродромных территорий. Это неизбежно приводит к возрастанию негативного влияния ЗВ на здоровье населения. По этой причине строительство воздушных портов, как правило, осуществляется вне населенных пунктов. Однако зачастую ввиду особенностей исторического развития, географического положения и иных обстоятельств аэропорты находятся не за пределами, а внутри городов. При этом закрытие таких аэропортов чаще всего не представляется возможным и рациональным с экономической точки зрения. Поэтому для защиты населения от негативного воздействия воздушных судов (ВС) разрабатываются СЗЗ – территории с особым режимом использования, на которых нежелательна жилая застройка. Установление границ СЗЗ для аэропортов и аэродромов в общих случаях осуществляется на основании расчетов концентрации ЗВ и физического воздействия ВС на окружающую среду, на натурных измерениях и оценке риска для здоровья населения для каждого конкретного аэропорта или аэродрома<sup>1</sup>.

В настоящее время расчеты выбросов ЗВ от двигателей ВС гражданской авиации осуществляются по методике, разработанной Федеральным государственным унитарным предприятием «Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации», с помощью которой вычисляется масса каждого ЗВ на основании расхода топлива, времени работы

---

<sup>1</sup> СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03. Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов. – 2010. – 77 с.

двигателей на соответствующем этапе и индексов эмиссии<sup>2</sup>. Таким образом, методика позволяет получить лишь количественную информацию об уровне загрязнения без учета особенностей движения ВС и погодных условий.

Существуют и другие подходы к решению проблемы моделирования распространения примесей, представленные в работах М.Е. Берляндта, А.О. Картышева, В.Ю. Медведева, М.Л. Асатурова, А.М. Старика, О.Н. Фаворского, В.А. Маслова и др. Однако анализ существующих методик и подходов показывает, что в них зачастую преобладают эмпирические соотношения либо отсутствует учет особенностей движения ВС. Так, например, модель М.Е. Берляндта учитывает распространение примесей за счет механизмов диффузии и переноса ветром, но не учитывает особенностей движения и траектории ВС. В результате отмеченные недостатки могут привести или к неоправданно заниженным размерам СЗЗ, что впоследствии негативно скажется на здоровье людей, или к завышению площади СЗЗ, что является недостатком с экономической точки зрения. Поэтому для получения более подробной информации об уровне и характере загрязнения требуется разработка новых методик расчета распространения ЗВ, учитывающих особенности движения ВС, тип двигателей, погодные условия и иные характеристики, которые позволят более точно определить границы СЗЗ.

**Цель работы и задачи исследования.** Целью настоящей работы является разработка подходов и методик для повышения достоверности расчетов уровня загрязнения территорий аэропортов, аэродромов и приаэродромных территорий и увеличения точности в установлении границ СЗЗ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1) проанализировать существующие методы расчета рассеивания ЗВ от двигателей ВС, выявить их недостатки;

---

<sup>2</sup> Методика расчета выбросов загрязняющих веществ двигателями воздушных судов гражданской авиации/ ФГУП ГосНИИ ГА, ЗАО ЦЭБ ГА; Картышев О. А., Медведев В. В., Запорожец А. И. – М., 2007. – 21 с.

2) разработать метод расчета рассеивания ЗВ от движущихся источников для основных этапов взлетно-посадочного цикла (ВПЦ);

3) создать на основе разработанного метода программный продукт для расчета рассеивания ЗВ от движущегося источника с базой данных отечественных авиадвигателей;

4) провести численное моделирование этапа «гонка двигателей» в двумерном и трехмерном приближении с учетом кинетической модели взаимодействия отработавшего топлива с воздухом;

5) проанализировать эффективность газоотбойника при различной структуре и при различном положении его относительно ВС.

**Научная новизна** определяется следующими полученными результатами:

1) разработана методика для оценки загрязнения путем численного решения задачи по расчету распространения ЗВ с помощью диффузии и переноса воздушными массами от движущихся ВС на различных этапах ВПЦ с учетом особенностей движения самолетов, типов их двигателей, погодных условий;

2) впервые проведен анализ этапа «гонка двигателей» в двумерном и трехмерном приближении в рамках численного решения уравнений Навье-Стокса с учетом кинетической модели взаимодействия компонентов отработавшего топлива с воздухом; исследованы газодинамические особенности, формирующиеся в результате взаимодействия выхлопных высокоскоростных, высокотемпературных струй с воздухом, с щитками, с самолетом и друг с другом;

3) произведены параметрические расчеты эффективности газоотбойников при различном отдалении относительно ВС и различной конструкции (сплошной и ячеистой) с учетом кинетической модели.

**Практическая значимость работы** заключается в следующем:

1) на основе разработанной методики для оценки уровня загрязнения, полученного в результате выполнения ВС взлетно-посадочных операций, создан программный продукт с базой данных авиационных типов двигателей, который позволяет проводить расчеты распространения химически неактивных ЗВ от движущихся источников и визуализировать результаты;

2) впервые проведен анализ этапа «гонка двигателей» в двумерном и трехмерном приближении в рамках численного решения уравнений Навье-Стокса с учетом кинетической модели взаимодействия компонентов отработавшего топлива с воздухом, позволяющий оценить уровень и характер распространения ЗВ с учетом их химической активности и взаимодействия с преградой;

3) проведенные расчеты концентраций ЗВ в долях предельно-допустимой концентрации (ПДК) при различных модификациях газоотбойника (сплошная и ячеистая конфигурация) и дальности его расположения относительно ВС могут быть использованы для оптимальной установки струеотклоняющего устройства.

### **Внедрение результатов работы**

Разработанные методика для расчета распространения химически неактивных продуктов сгорания авиатоплива от движущихся ВС при выполнении ими стандартного ВПЦ и программный продукт используются:

1) в деятельности ОАО «СИБПРОЕКТНИИАВИАПРОМ» при расчете СЗЗ различных аэродромов, что позволяет повысить качество их проектирования;

2) в учебном процессе кафедры инженерных проблем экологии ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» при чтении курса лекций по дисциплине «Компьютерные технологии в области техносферной безопасности, экологии и природопользования» для магистрантов первого года обучения по направлению 280700.68 (20.04.01) «Техносферная безопасность».

Имеются два акта о внедрении результатов диссертационной работы.

### **Методология и методы исследований**

При моделировании распространения ЗВ используется численное решение систем газодинамических уравнений.

Для расчетов распространения ЗВ при стандартном ВПЦ предполагается, что в течение времени моделирования процесса газодинамические параметры в атмосфере не меняются, а распространяющиеся примеси не вступают в химические реакции с компонентами воздуха. Таким образом, система газодинамических уравнений сводится к уравнению распространения примеси с

помощью диффузии и переноса. Сформулированное уравнение решается численно методом продольно-поперечной прогонки. Данный подход положен в основу разработанного программного продукта.

Моделирование этапа «гонка двигателей» осуществляется в рамках численного решения полной системы уравнений Навье-Стокса. Для решения данной задачи используется программный продукт Ansys Fluent, в котором происходит решение данной системы с помощью метода конечных объемов.

**Достоверность результатов** проведенных расчетов основывается на тестовых задачах, решение которых сопоставляется с натурными измерениями уровня загрязнения в контрольных точках рассматриваемой территории.

Предложенный в работе метод для расчета распространения ЗВ от движущихся ВС успешно опробован при установлении границ СЗЗ следующих аэродромов:

- Новосибирского авиационного завода им. В.П. Чкалова,
- Комсомольского-на-Амуре авиационного завода им. Ю.А. Гагарина,
- Иркутского авиационного завода,

а также для аэропорта «Советский» (Ханты-Мансийский автономный округ) и др.

### **Основные результаты, выносимые на защиту**

1) Предложена усовершенствованная модель процесса распространения ЗВ, включающая особенности движения источника.

2) Разработана программная реализация методики оценки загрязнения, включающая в себя базу данных с характеристиками авиационных двигателей различных типов.

3) Проведен анализ этапа «гонка двигателей» в двумерном и трехмерном приближении в рамках численного решения уравнений Навье-Стокса с учетом взаимодействия газодинамических струй с атмосферным воздухом, с щитками, друг с другом; оценено влияние скорости и направления ветра на струи; предложена кинетическая модель взаимодействия продуктов сгорания авиатоплива с кислородом воздуха.

4) Показана эффективность газоотбойника различной конфигурации (сплошной и ячеистой) и при различной отдаленности его от ВС.

### **Апробация результатов работы**

Основные результаты диссертационной работы докладывались на семинаре лаборатории физических проблем управления газодинамическими течениями и общеинститутском семинаре «Теоретическая и прикладная механика» Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, на научном семинаре факультета летательных аппаратов ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», а также на 11 международных и российских конференциях, научно-образовательных форумах и школах-семинарах: Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона» (г. Новосибирск, 2012, 2013, 2014, 2015), 6-й Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Экологические проблемы промышленных городов» (г. Саратов, 2013), Восемнадцатой международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (г. Алушта, 2013), XXV Международной научно-практической конференции «Технические науки – от теории к практике» (г. Новосибирск, 2013), Международном научно-образовательном форуме Хэйлунцзян – Приамурье (г. Биробиджан, 2013), XII Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты» (г. Новосибирск, 2014), XIV Международной школе-семинаре «Модели и методы аэродинамики» (г. Евпатория, 2014), XV Международной школе-семинаре «Модели и методы аэродинамики» (г. Евпатория, 2015).

### **Публикации**

По результатам диссертационного исследования опубликовано 15 печатных работ, в том числе 2 научные статьи в изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка обозначений, списка литературы и двух

приложений; содержит 184 страницы текста, два акта о внедрении результатов, 96 рисунков, 16 таблиц. Список литературы состоит из 72 источников.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** представлена общая характеристика диссертационной работы, сформулированы актуальность и цели исследования, отражены научная и практическая значимость полученных результатов, а также кратко изложено содержание диссертации.

**Первая глава** посвящена аналитическому обзору проблем, связанных с загрязнением территорий аэропортов и аэродромов, и методам их решения. Отмечаются три зоны воздействия ВС на окружающую среду: приземный слой атмосферы, верхняя тропосфера и нижняя стратосфера. В качестве объекта исследования определен приземный слой атмосферы. Загрязнение данной области происходит в основном за счет выполнения самолетами взлетно-посадочных операций, а также из-за процессов, связанных с эксплуатацией ВС, таких как опробование силовых установок, и с деятельностью служб, необходимых для обеспечения бесперебойной работы аэропортов, которые создают фоновое загрязнение. В целях регулирования неблагоприятного воздействия ВС на окружающую среду устанавливаются нормативно-правовое обоснование необходимости контроля уровня загрязнения и наличия СЗЗ зон у объектов, принимающих ВС, и международные нормы гражданской авиации, устанавливаемые Международной организацией гражданской авиации (ИКАО).

Для выполнения требований по установлению СЗЗ необходимо проводить расчеты уровня загрязнения для каждого конкретного случая. В связи с этим разрабатываются различные методики оценки уровня загрязнения. В главе приводится обзор основных методов расчета рассеивания ЗВ на территориях аэропортов, аэродромов и на прилегающих к ним землях.

Среди рассмотренных методов можно выделить основные группы: натурные эксперименты, эмпирические, полуэмпирические и упрощенные модели описания физических процессов.

Натурные эксперименты позволяют более достоверно определить экологическую обстановку на интересующем объекте исследования. Однако это довольно сложная, трудоемкая, продолжительная и дорогостоящая процедура.

Применение эмпирических моделей основывается на гауссовском распределении ЗВ с эмпирическими коэффициентами, при этом предполагается, что источник загрязнения является стационарным. Полуэмпирические модели имеют более развитый математический аппарат, что позволяет использовать их в расчетных случаях, отличающихся от экспериментальных, и учитывать, например, скорость и направление ветра. Однако ввиду отсутствия учета индивидуальных особенностей рассматриваемой области и ВС результат может оказаться весьма приблизительным.

Некоторые методики в своей основе имеют диффузионную модель распространения ЗВ, но при этом не учитывают особенности движения ВС по взлетно-посадочной полосе. Зачастую эти методики используют аналитическое решение.

**Вторая глава** посвящена расчету распространения ЗВ на этапах ВПЦ (руление, взлет, набор высоты до 915 м, заход на посадку с высоты 915 м, посадка и руление после посадки) с помощью предположений, что параметры в атмосфере не меняются, источник загрязнения является точечным по отношению к размерам расчетной области. Предполагается, что загрязнение окружающей среды происходит за счет диффузии и переноса воздушными массами. При этом ЗВ считаются химически неактивными:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + k \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + c \frac{\partial \varphi}{\partial x} = f(t, x), \quad (2.1)$$

где  $x = x(x_1, x_2)$  – координаты;  $\varphi(x, t)$  – объемная (или массовая) концентрация примеси, мг/м<sup>3</sup>;  $c = c(c_1, c_2)$  – скорость движения воздуха, м/с;  $f(t, x)$  – функция, задающая источник загрязнения;  $t$  – время, с;  $k = k(k_1, k_2)$  – коэффициент диффузии, определяемый экспериментально или на основе справочных данных.

Задача рассматривается на каждом этапе ВПЦ. При этом считается, что источник загрязнения движется и возможно изменение скорости движения, ускорения и траектории:

$$x_t = x_0 + vt + \frac{at^2}{2}, \quad (2.2)$$

где  $x_t = x_t(x_{t1}, x_{t2})$  – текущие координаты источника, м;  $x_0 = x_0(x_{01}, x_{02})$  – начальное положение источника, м;  $v = v(v_1, v_2)$  – составляющие скорости движения самолета, м/с;  $a = a(a_1, a_2)$  – ускорение, с которым движется самолет, м/с<sup>2</sup>;  $t$  – текущий момент времени, с.

Таким образом, в любой момент времени, в любой рассматриваемой точке количество ЗВ определяется интенсивностью источника и его удалением (см. рисунок 1):

$$f = Q \cdot e^{-dl^2/k \cdot h^2}, \quad (2.3)$$

где  $h$  – характерный линейный размер источника загрязнения;  $k$  – коэффициенты атмосферной турбулентности, м<sup>2</sup>/с;  $dl = \sqrt{(x_1 - x_{t1})^2 + (x_2 - x_{t2})^2}$  – расстояние между источником загрязнения и текущей точкой, м (см. рисунок 1);  $x_1, x_2$  – координаты текущей точки, м;  $x_{t1}, x_{t2}$  – координаты источника загрязнения, м;  $Q$  – интенсивность выброса примеси двигателей, г/с.

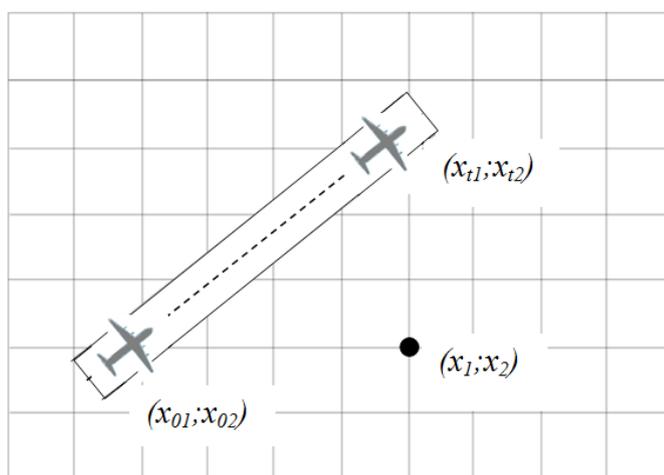


Рисунок 1 – Положение источника

В качестве начальных условий выступает фоновое загрязнение, в качестве граничных условий – поток через границу.

Уравнение (2.1) с начальными и граничными условиями решается с помощью метода продольно-поперечной прогонки, который является наиболее распространенным для решения параболических уравнений.

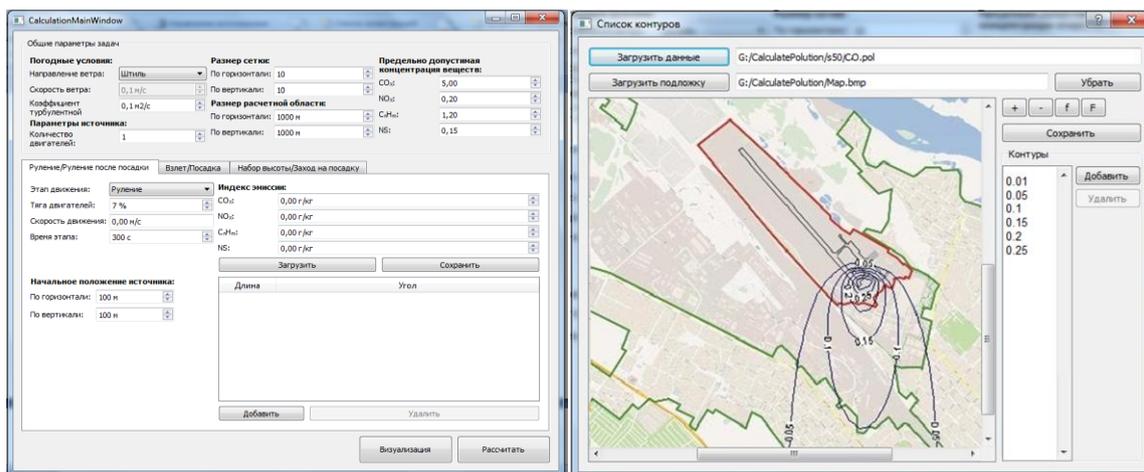
Реализация методики расчета рассеивания ЗВ от движущихся источников осуществляется с помощью программ, написанных для каждого этапа ВПЦ. Для удобства использования программ создан интерфейс с помощью языка программирования C++ и библиотеки QT.

Программный продукт условно состоит из двух основных частей:

- 1) определение общих параметров задачи, одинаковых для всех этапов движения;
- 2) настройка этапов ВПЦ. К общим параметрам задачи относятся погодные условия, количество двигателей, размеры расчетной области, размер сетки, уровень ПДК. Вторая условная часть программы позволяет производить индивидуальные настройки для каждого этапа, включая особенности взлетно-посадочной полосы (ВПП) и характеристики самолета, такие как время движения, индексы эмиссии, скорость движения. В программном продукте имеется библиотека данных, которая содержит характеристики отечественных авиадвигателей с возможностью пополнения.

На рисунке 2, а приведен пример интерфейса – окно программы с активной вкладкой для этапа «руление». Результат представляется в виде изолиний долей ПДК для каждого рассматриваемого ЗВ. Программа позволяет отрисовывать изолинии с использованием карты рассматриваемой местности в качестве подложки, см. рисунок 2, б. Это позволяет не только делать выводы об уровне загрязнения приаэродромных территорий, но и оценивать воздействие на прилегающие жилые кварталы.

Исходя из ряда таких расчетов для наиболее часто повторяющихся направлений ветра, времени года и суток, основных типов самолетов, которые принимает аэропорт, могут быть даны рекомендации по установлению СЗЗ.



*а*

*б*

Рисунок 2 – Программный продукт для расчета рассеивания ЗВ от движущихся источников загрязнения: *а* – окно для расчета, *б* – окно визуализации

В качестве верификации во второй главе приведено сравнение распространения  $CO$ ,  $NO_x$ , полученных путем экспериментальных замеров вдоль струи, и расчетных, полученных путем моделирования эксперимента. Результаты хорошо согласуются друг с другом.

**Третья глава** посвящена расчету распространения химически активных ЗВ, полученных в результате сгорания авиатоплива на этапе эксплуатации самолетов «гонка двигателей». Данный этап не включен ИКАО в стандартный ВПЦ, однако он вносит существенный вклад в загрязнение территории аэродрома. «Гонка двигателей» предназначена для проверки работоспособности силовых установок летательного аппарата и представляет собой запуск двигателей на всех режимах эксплуатации – от малого газа до максимальной тяги за строго отведенное время. При этом ВС располагается на специальной площадке, оборудованной струеотклоняющими устройствами. За общее время гонки, которое может достигать получаса, самолет оказывает значительное воздействие на состояние атмосферы аэродрома. Реактивные струи, выходя из сопел двигателей, взаимодействуют друг с другом, с самолетом, с окружающей средой и, огибая преграду, распространяются на приаэродромной территории. Для анализа данного взаимодействия и характера распространения ЗВ использовалось численное

решение уравнений Навье-Стокса, реализованное с помощью коммерческого пакета программ Ansys Fluent.

В качестве объекта исследования в третьей главе рассматриваются две модельные задачи: 1) истечение отдельной осесимметричной струи продуктов сгорания авиатоплива; 2) истечение четырех струй в двумерной постановке, включающей самолет в плане и газотбойник. Расчеты проводятся с учетом возможных химических превращений при взаимодействии с воздухом для наиболее опасных веществ, выделяемых ИКАО.

Расчет концентраций ЗВ сводится к анализу двух режимов работы двигателей, наиболее неблагоприятных для окружающей среды, – режимов максимальной и минимальной тяги, приводящих соответственно к полному и неполному сгоранию авиатоплива. При этом среди возможного перечня ЗВ, полученных в результате сгорания авиатоплива, рассматриваются только  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_n\text{H}_m$ , сажа – как вещества, уровень выброса которых контролирует ИКАО. В связи с этим применяется следующая кинетическая модель:



Параметры уравнений взяты из соответствующих справочников.

Для случая полного сгорания топлива принимается следующая модель: смесь сажи, оксидов азота и углерода, диоксидов азота и углерода, молекулярного кислорода и азота. При этом в качестве веществ, полученных в ходе сгорания авиатоплива, задаются сажа, монооксиды азота и углерода. Неполное сгорание топлива дополняется несгоревшими углеводородами.

При численном решении используются следующие настройки программы Ansys Fluent:

- тип решателя ”*density-based*”;

---

<sup>3</sup> Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. Топлива на основе кислорода / В. Е. Алемасов, А. Ф. Дрегаллин, А. П. Тишин и др. – Москва, 1972. – Т. 2. – 256 с.

<sup>4</sup> Краткий справочник физико-химических величин [Текст] / сост. Н. М. Барон, Э. И. Квят, Е. А. Подгорная [и др.] ; под ред. К. П. Мищенко, А. А. Равделя. – 7 изд., испр. – Ленинград : Химия. Ленингр. отд-ние, 1974. – 200 с.

- модель турбулентности SST  $k-\omega$ ;
- явная схема решения второго порядка точности аппроксимации;
- граничные условия на срезе сопел – условия массового расхода, на границах области – условия в окружающей среде.

Результаты расчетов показывают количественную и качественную картину распространения ЗВ, полученных в процессе гонки двигателей, и продуктов их окисления в воздухе, см. рисунок 3.

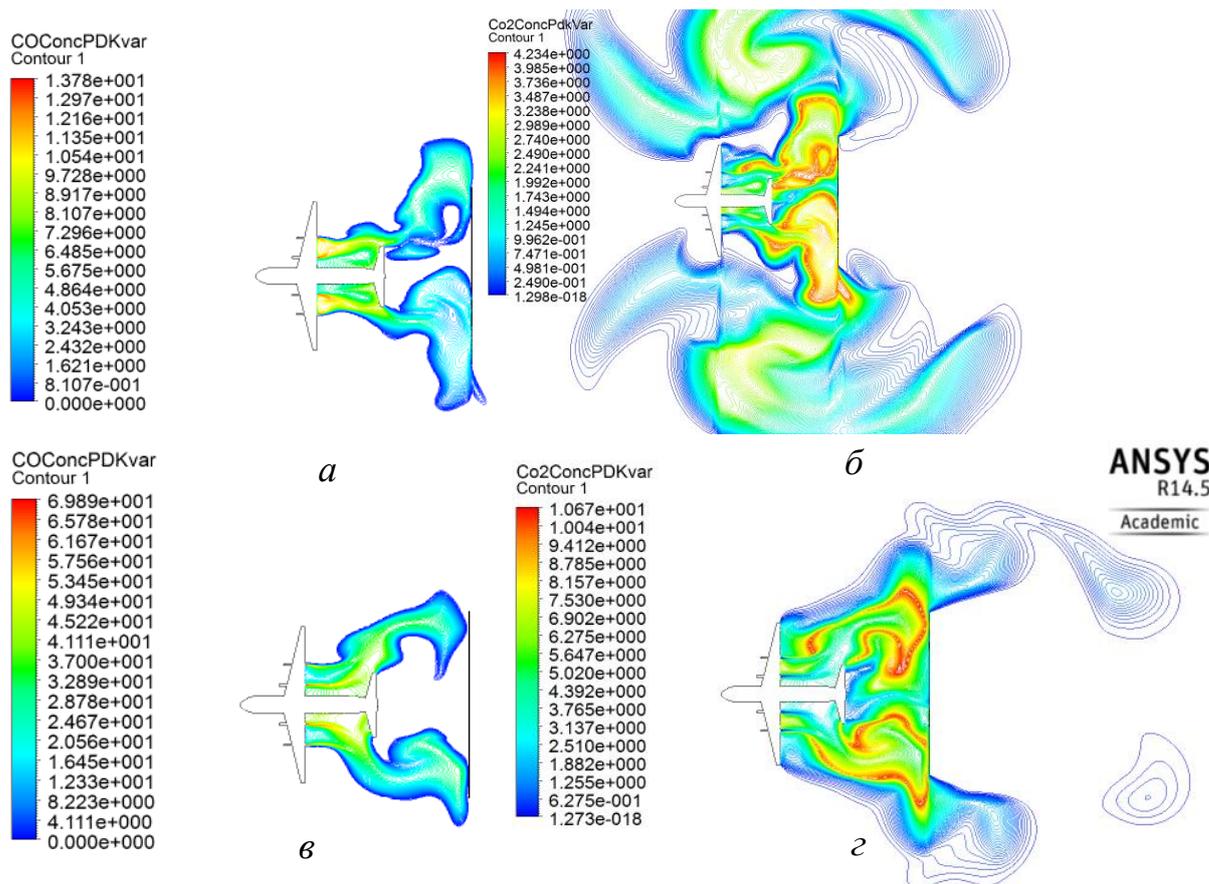


Рисунок 3 – Изолинии долей ПДК: *а* – CO при полном сгорании, *б* – CO<sub>2</sub> при полном сгорании, *в* – CO при неполном сгорании, *г* – CO<sub>2</sub> при неполном сгорании

Проведенные расчеты позволяют установить, что при максимальных оборотах двигателя показатели NO приобретают наибольшие значения, CO – наименьшие, и наоборот – при минимальной тяге. Также установлено, что при полном сгорании топлива область воздействия ЗВ больше, чем при неполном сгорании: для CO, NO – в 1.3 раза, для CO<sub>2</sub> и NO<sub>2</sub> – в 2 раза.

С целью верификации предложенной модели произведен расчет осесимметричной струи на основании данных, представленных в работе И.С. Родюкова<sup>5</sup>. Результаты численного моделирования сравнивались с экспериментальными данными, показывающими уровень загрязняющих веществ CO, NO<sub>x</sub> в долях ПДК вдоль струи ВС. Проведенное сравнение показывает хорошее согласование результатов, см. рисунок 4.

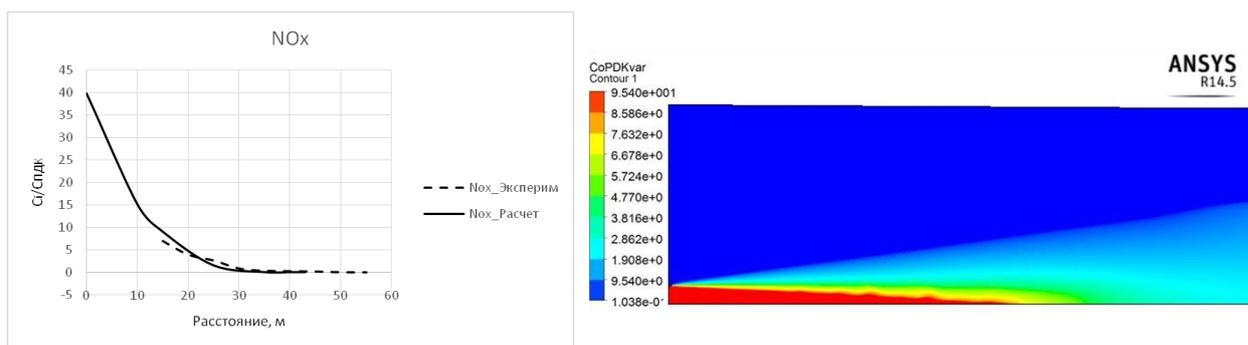


Рисунок 4 – Сравнение расчетных и экспериментальных значений долей ПДК для NO<sub>x</sub>, CO

С целью исследования эффективности различных конфигураций газоотбойника в главе представлен расчет ячеистой конструкции щита. Отмечаются меньшие массовые доли оксидов углерода и азота во всех сечениях, расположенных на различном отдалении от сопел двигателей (в непосредственной близости от сопел, на хвосте самолета, перед газоотбойником и за ним), и активное образование диоксидов в непосредственной близости от сопел. Далее этот уровень сохраняется относительно постоянным, см. рисунок 5.

<sup>5</sup> Родюков, И. С. Геоэкологическая оценка приземного слоя атмосферы на территории аэродромного комплекса [Текст] : дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.36 / И. С. Родюков. – Воронеж, 2005. – 117 с.

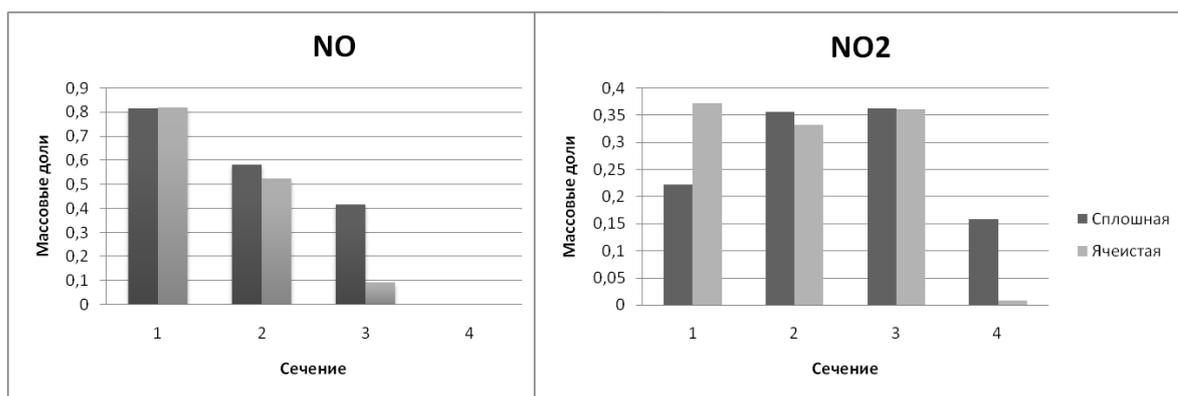


Рисунок 5 – Гистограммы распределения ЗВ на различном отдалении от сопел:

1 – непосредственно за соплом; 2 – за хвостом самолета; 3 – перед газотбойником; 4 – за газотбойником

Рассмотренная постановка задачи позволяет оценить доли ПДК ЗВ. На основании исследования можно сделать следующие выводы: ячеистая конструкция способствует уменьшению скопления ЗВ, –  $C_i/C_{ПДК}$  по сравнению со сплошным щитом: на 2.84 % для  $NO_2$ , на 3.11 % для  $NO_x$ , на 3.05 % для CO и на 5.67 % для  $CO_2$ .

В четвертой главе приводятся результаты трехмерного моделирования распространения химически активных ЗВ с использованием кинетической модели, представленной в третьей главе. Рассматривается самолет, располагаемый на площадке для опробования силовых установок. Настройки решателя совпадают с приведенными в третьей главе. Схема решения – нестационарная, неявная.

Пример полученных результатов представлен на рисунке 6. На рисунке 6, а показано распределение массовых долей  $NO_2$ . Результаты исследования показывают, что происходит взаимодействие струй друг с другом в районе хвостовой части самолета, и единственной преградой на их пути является газотбойник, при достижении которого отмечается активное перетекание ЗВ через него, но при этом происходит снижение уровня загрязнения. На рисунке 6, б представлены линии тока. Из рисунка видно, что образование вихрей происходит только за газотбойником.

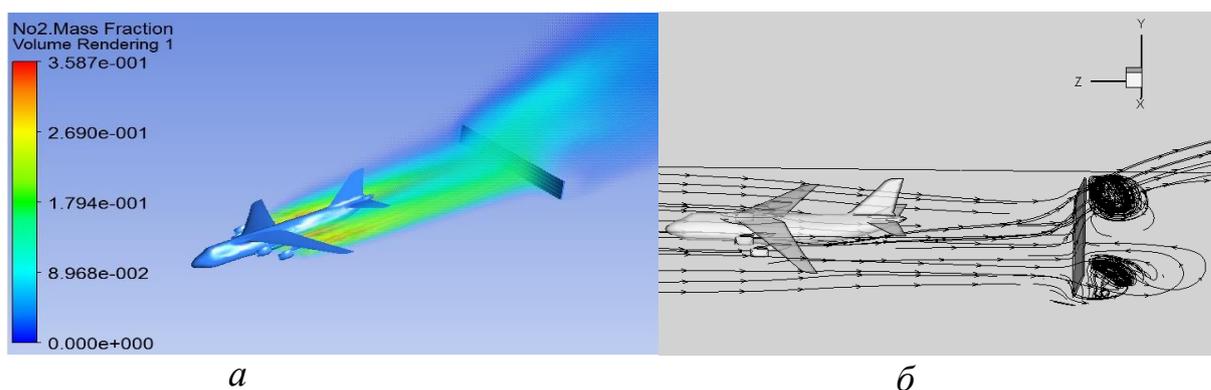


Рисунок 6 – Трехмерная визуализация взаимодействия потока со сплошной преградой: *а* – распространение диоксида азота, *б* – вихревая картина

На рисунке 7 приведен пример распространения ЗВ при взаимодействии с ячеистой конструкцией преграды. Трехмерный расчет ячеистой структуры наглядно отображает процесс распространения ЗВ через преграду. За счет наклона ячеек вверх происходит соответствующий разворот потока, что способствует наибольшему рассеиванию и меньшему уровню загрязнения: максимальные доли ПДК  $\text{NO}_2$  при ячеистой конструкции газоотбойника меньше на 5.3 %, для  $\text{CO}_2$  – на 0.25%, чем при сплошной. Также из рисунка видно, что за счет перетекания потока через преграду образование вихрей не отмечается.

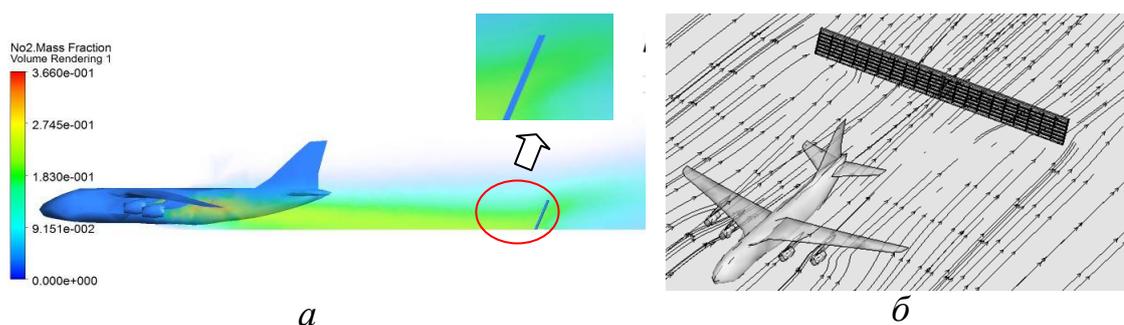


Рисунок 7 – Трехмерная визуализация взаимодействия потока с ячеистой преградой: *а* – распространение диоксида азота, *б* – вихревая картина

На рисунках 8 и 9 приведены примеры результатов расчета распространения ЗВ при различной дальности установки газоотбойника от ВС. В качестве объекта исследования принималась схема установки газоотбойника

ближе на 20 % и дальше на 20 % от его первоначального положения. Проведенное исследование эффективности расстояния, на котором установлено струеотклоняющее устройство, показывает, что при приближении газоотбойника на 20 % происходит увеличение массовых долей перед газоотбойником для  $\text{NO}_2$  на 14.7 %, для  $\text{CO}_2$  на 15.5 %, а при отдалении на 20 % – уменьшение  $\text{NO}_2$  на 14.6 %,  $\text{CO}_2$  на 13.16 %.

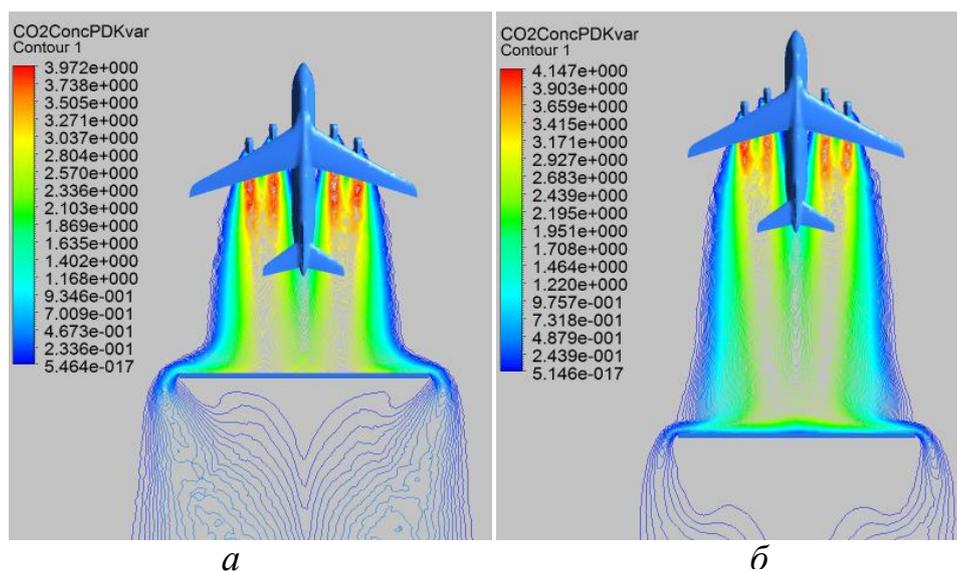


Рисунок 8 – Доли  $\text{CO}_2$  при различном расстоянии газоотбойника от ВС:  
*а* – на 20% ближе; *б* – на 20% дальше

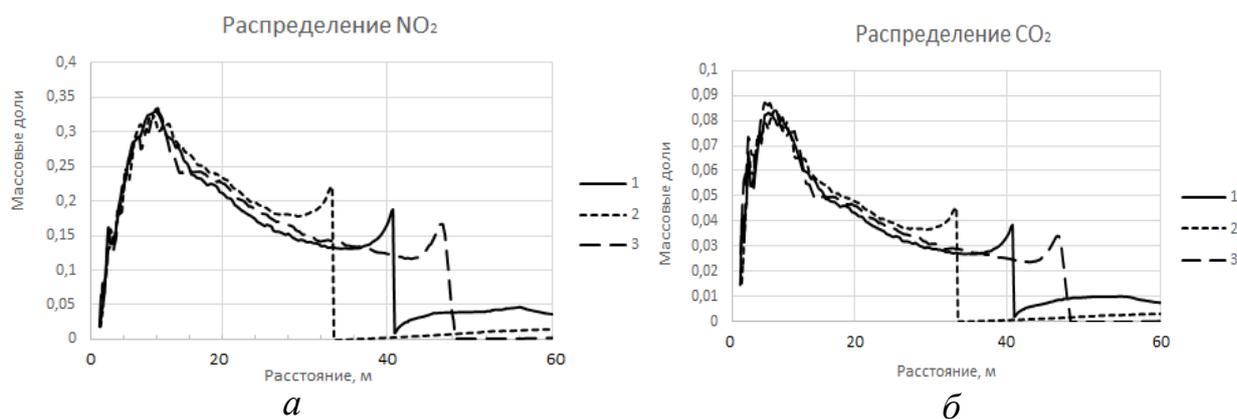


Рисунок 9 – Распределение ЗВ вдоль сопла при различной установке  
газоотбойника: *а* –  $\text{NO}_2$ , *б* –  $\text{CO}_2$

Также в главе приводится оценка сходимости решения. Проведены расчеты одного и того же случая на двух расчетных сетках: исходной, в 1 500 000 ячеек, и

со сгущением до 4 500 000. Полученное расхождение максимальных массовых долей не превышает 5 %.

Проведенное сравнение результатов расчетов одного и того же случая в двумерной и трехмерной постановке показывает, что максимальное расхождение величин массовых долей составляет 2.72 %, что оправдывает использование в работе более простой двумерной постановки для получения количественной оценки значений ЗВ. Однако картину действительных течений и поведения газодинамических струй моделирует трехмерная постановка, которая также позволяет проанализировать поведение струй в любой плоскости области решения.

**В заключении** формулируются основные выводы диссертационной работы:

1. Разработана методика для оценки загрязнения от движущихся ВС на различных этапах взлетно-посадочного цикла с учетом особенностей движения самолетов, типов их двигателей, погодных условий. Подход основан на использовании математической модели распространения химически пассивной примеси за счет механизмов диффузии и переноса воздушными массами.

2. Создан программный продукт на основе разработанной методики с базой данных отечественных авиационных двигателей, который позволяет проводить расчеты распространения химически неактивных ЗВ от движущихся источников и визуализировать результаты.

3. Впервые проведен анализ этапа «гонка двигателей» в двумерном и трехмерном приближении в рамках численного решения уравнений Навье-Стокса с учетом химической активности продуктов сгорания авиатоплива, оценка которой производится для двух режимов работы двигателей: максимального и минимального, приводящих соответственно к полному и неполному сгоранию топлива.

4. Предложена кинетическая модель, описывающая взаимодействие с компонентами воздуха монооксида азота и углерода как веществ, уровень которых контролирует ИКАО.

5. Показано, что максимальные массовые доли продуктов реакций монооксидов азота и углерода –  $CO_2$  и  $NO_2$  располагаются на границе потока с воздухом; полное сгорание топлива приводит к увеличению области воздействия ЗВ для  $CO$ ,  $NO$  – в 1.3 раза, для  $CO_2$  и  $NO_2$  – в 2 раза, чем при неполном сгорании топлива.

6. Исследованы газодинамические особенности, формирующиеся в результате взаимодействия выхлопных высокоскоростных, высокотемпературных струй с воздухом, газоотбойными щитками, самолетом и друг с другом.

7. Проведены параметрические расчеты эффективности газоотбойников при различном отдалении относительно воздушного судна, и различной конструкции (сплошной и ячеистой) с учетом кинетической модели. Показано, что использование ячеистого струеотклоняющего устройства приводит к уменьшению максимальных долей ПДК для  $CO_2$  – 0.25%, для  $NO_2$  – 5.33% на максимальных оборотах двигателя; расположение газоотбойника ближе к ВС на 20% приводит к увеличению массовых долей в окрестности газоотбойника на 14.7% для  $NO_2$  и на 15.3% для  $CO_2$ ; расположение газоотбойника дальше от ВС на 20% способствует уменьшению массовых долей в окрестности газоотбойника для  $NO_2$  на 11.2% и на 15.4% для  $CO_2$ .

### **Публикации по теме диссертации**

#### *Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК*

1. Голубева А. О. [Турчинович А. О.] Численный расчёт рассеивания загрязняющих веществ от эксплуатации самолётов на прилегающих к аэропортам и аэродромам территориях / А. О. Голубева [А. О. Турчинович], В. В. Ларичкин, Т. А. Коротаева // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2014. – № 1(22). – С. 52–61.

2. Турчинович А. О. Моделирование химического взаимодействия продуктов сгорания с воздухом за срезом сопел двигателей самолетов / А. О. Турчинович // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. – 2015. – Т. 16, № 2. – С. 438–447.

*В сборниках статей и материалах научных конференций*

1. Голубева А. О. [Турчинович А. О.] Математическое моделирование рассеивания газообразных выбросов от двигателей воздушных судов / А. О. Голубева [А. О. Турчинович], Т. А. Коротаева, В. В. Ларичкин // Труды Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона», посвященной 200-летию Бородинской битвы (18–20 апр. 2012 г.). – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2012. – С.135–138.
2. Голубева А. О. [Турчинович А. О.] Численное моделирование рассеивания выбросов в атмосфере от авиационного транспорта / А. О. Голубева [А. О. Турчинович], Т. А. Коротаева, В. В. Ларичкин // Труды 14 Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона», посвященной 100-летию со дня рождения А. И. Покрышкина (24–26 апр. 2013 г.). – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013. – С. 87–91.
3. Голубева А. О. [Турчинович А. О.] Моделирование процесса распространения загрязняющих веществ от воздушных судов на этапе гонка двигателей / А. О. Голубева [А. О. Турчинович]// Технические науки — от теории к практике : сб. статей по материалам 25 междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск : СибАК, 2013. – № 8 (21). – С. 131–138.
4. Голубева А. О. [Турчинович А. О.] Математическое моделирование рассеивания выбросов от воздушных судов на приаэродромных территориях / А. О. Голубева [А. О. Турчинович], Т. А. Коротаева, В. В. Ларичкин // Экологические проблемы промышленных городов : сб. науч. тр. по материалам 6 Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием : в 2 ч. – Саратов, 2013. – Ч. 1. – С. 169–172.
5. Голубева А. О. [Турчинович А. О.] Использование упрощенной модели для оценки рассеивания выбросов от воздушных судов / А. О. Голубева [А. О. Турчинович]// Proceedings of the 17 international conference on computational mechanics and modern applied software systems, CMMASS'2013, Moscow, 22–31 May 2013. – Moscow, 2013. – P. 717–719.

6. Голубева А. О. [Турчинович А. О.] Анализ загрязнения приаэродромной территории на этапе гонка двигателей / А. О. Голубева [А. О. Турчинович] // Международный научно-образовательный форум Хэйлуцзян – Приамурье: Сборник материалов I Международной научной конференции, Россия, г. Биробиджан, 30 октября 2013 г. Биробиджан, ФГБОУ ВПО «ПГУ им. Шолом-Алейхема» в 2 Ч. – Ч.1. – С. 253–255.

7. Голубева А. О. [Турчинович А. О.] Анализ загрязнений приаэродромной территории на этапе "гонка двигателей" / А. О. Голубева [А. О. Турчинович] // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. – 2013. – № 2 (13). – С. 9–14.

8. Голубева А. О. [Турчинович А. О.] Расчет взаимодействия четырех струй отработавших газов авиационных двигателей с газоотбойником на этапе «гонка двигателей» воздушных судов / А. О. Голубева [А. О. Турчинович], Т. А. Коротаева, В. В. Ларичкин // Наука. Промышленность. Оборона : тр. 15 Всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 23–25 апр. 2014 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – С. 152–156.

9. Голубева А. О. [Турчинович А. О.] Моделирование процесса взаимодействия выхлопных газов от двигателей воздушных судов с газоотбойником на протяжении всего этапа «гонка двигателей» / А. О. Голубева [А. О. Турчинович], Т. А. Коротаева // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты : сборник материалов XII международной науч.-практич. конф., Новосибирск, 24 мая 2014г. – С. 61–65.

10. Голубева А. О. [Турчинович А. О.] Расчёт взаимодействия струй отработавших газов авиационных двигателей с газоотбойником на этапе «гонка двигателей» / А. О. Голубева [А. О. Турчинович], Т. А. Коротаева, В. В. Ларичкин // Модели и методы аэродинамики : материалы 14 междунар. shk.-семинара, Евпатория, 4–13 июня 2014 г. – Москва : МЦНМО, 2014. – С. 46–47

11. Турчинович А. О. Численное моделирование распространения выхлопных газов от двигателей самолетов с учетом кинетической модели / Т. А. Коротаева, А. О. Турчинович // Наука. Промышленность. Оборона : тр. 16 Всерос.

науч.-техн. конф., посвящ. 70-летию Победы в Великой Отечественной войне (Новосибирск, 22–24 апр. 2015 г.). – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2015. – С. 448–452.

12. Турчинович А. О. Расчет распространения загрязняющих веществ при гонке двигателей с учетом химических реакций / Т. А. Коротаева, А. О. Турчинович // Модели и методы аэродинамики : материалы 15 междунар. шк.-семинара, Евпатория, 4–11 июня 2015 г. – Москва : МЦНМО, 2015. – С. 87–88.

13. Турчинович А. О. Особенности формирования загрязняющих веществ при полном и неполном сгорании авиатоплива / Т. А. Коротаева, А. О. Турчинович // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. – 2015. – № 2 (19). – С. 45–59.