

На правах рукописи

РОМАНЮК Денис Андреевич

**НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ДВУХФАЗНЫЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА  
С ЧАСТИЦАМИ В РЕШЁТКАХ ПРОФИЛЕЙ**

Специальность: 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в Балтийском государственном техническом университете «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Научный руководитель: **Циркунов Юрий Михайлович**  
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Осипцов Александр Николаевич**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
зав. лабораторией механики многофазных сред,  
Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова

**Шмидт Александр Александрович**  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник,  
зав. сектором численного моделирования,  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе  
РАН

Ведущая организация: Институт теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича СО РАН

Защита состоится «21» декабря 2017 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.232.30 на базе Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., 28, математико-механический факультет, ауд. 2448.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. М. Горького Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9 и на сайте <https://disser.spbu.ru/disser/soiskatelyu-uchjonoj-stepeni/dis-list/details/14/1483.html>

Автореферат разослан «\_\_\_» октября 2017 года.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 212.232.30  
доктор физ.-мат. наук, доцент



Кустова Е.В.

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы

Авиационные двигатели, как известно, не предназначены для работы в запылённой среде, однако самолёты могут взлетать и приземляться в атмосфере, содержащей пыль или песок. Они могут также пролетать через облака вулканического пепла. Во всех этих случаях двигатель засасывает взвешенные твёрдые частицы, которые негативно влияют на его характеристики. Дисперсные частицы во входном высокоскоростном потоке, будучи более инерционными, чем несущий газ, сталкиваются с лопатками венцов компрессоров и другими элементами проточного тракта, вызывая их абразивную эрозию. Частицы также могут осаждаться на горячих поверхностях элементов турбины и сопла, забивать каналы охлаждения лопаток и т.п. Эти и некоторые другие явления подробно описаны в обзорах Named & Tabakoff 2006 и Vons 2010. Задача количественной оценки влияния частиц на характеристики и ресурс авиадвигателя многофакторна и очень сложна. Она находится в центре внимания исследователей последние 40 лет. Моделирование течения запылённого газа через венцы лопаток компрессора и турбины является одной из наиболее важных частей всей задачи. Строго говоря, это нестационарное трёхмерное течение, однако многие ключевые его особенности в последовательных ступенях осевого компрессора (также и других осевых турбомашин) могут быть изучены с помощью модели двумерного течения в плоскости, представляющей развёртку некоторого кольцевого сечения. Такой подход хорошо известен как теория плоских решёток (Степанов Г.Ю. Гидродинамика решёток турбомашин, 1962).

Несмотря на огромный прогресс в развитии вычислительных методов в механике жидкости и газа (МЖГ), создание, постоянное совершенствование и широкое распространение достаточно универсальных пакетов программ для численного моделирования различных течений, в том числе решения задач газодинамики турбомашин (типа Ansys CFX, Ansys Fluent, Numeca FineTurbo и др.), несмотря на появление и доступность мощных вычислительных комплексов (кластеров), и даже несмотря на развитие самой механики многофазных сред, проблема разработки новых математических моделей, новых подходов и новых алгоритмов для решения задач двухфазной газодинамики остаётся одной из чрезвычайно актуальных. Это связано, во-первых, с тем, что потоки газа с дисперсной примесью встречаются во многих приложениях (в современном энергетическом и промышленном оборудовании, в экспериментальных установках, авиационных и ракетно-космических системах, технологических процессах и т.д.). Во-вторых, такие потоки очень разнообразны по своим свойствам, причем их структура значительно сложнее, чем структура течений чистого газа. Наконец, двухфазным течениям присущи многие случайные эффекты, которые могут играть важную роль даже на фоне детерминированного течения несущего газа. В рамках классической теории взаимопроникающих континуумов многие важные случайные эффекты, такие, как рассеяние частиц при отскоке от обтекаемой поверхности, столкновения между частицами и т.п. не

учитываются. В то же время часто именно они позволяют понять и объяснить наблюдаемые в опытах особенности реальных двухфазных течений.

В этой связи актуальным является разработка и численная реализация математических моделей течений запылённого газа в элементах турбомашин с учётом различных случайных явлений в потоке примеси, а также определение и оценка относительной роли этих эффектов в перераспределении частиц в потоке и формировании картины и полей параметров течения дисперсной фазы. Для этой цели на первом этапе при моделировании течения несущего газа разумно использовать теорию плоских решёток, однако движение частиц следует рассматривать в трёхмерной постановке, так как их рассеяние при отскоке от лопаток и столкновения между ними имеют существенно трёхмерный характер.

### **Основные цели работы**

- Разработка математической модели, алгоритма расчёта и его численная реализация для моделирования нестационарного течения двухфазной смеси газа с дисперсными частицами в системе решёток "ротатор-статор" с учётом следующих эффектов случайной природы: разброс частиц по размерам, рассеяние частиц при отскоке от лопаток (профилей) из-за их несферической формы, столкновения между частицами, а также с учётом обратного влияния примеси на течение несущего газа.
- Расчёт и анализ двухфазных течений в системе решёток. Оценка роли отдельных факторов, а также их совместного влияния на динамику примеси и её параметры.

### **Научная новизна**

1. Задача о нестационарном двухфазном течении газа с частицами в системе решёток профилей с учётом разброса частиц по размерам, рассеяния частиц при отскоке из-за несферичности формы, столкновений между частицами и обратного воздействия примеси на течение газовой фазы рассмотрена впервые.
2. Полностью оригинальной является численная реализация математической модели для расчёта нестационарных двухфазных течений в решётках.
3. Впервые в результате численного моделирования двухфазных течений в решётках получены оценки роли случайных факторов на динамику, картину и параметры течения примеси в широких диапазонах основных определяющих параметров (размер, форма и концентрация частиц).

### **Достоверность результатов**

Достоверность основана на использовании хорошо известных уравнений гидромеханики, уравнений движения частиц с учетом наиболее важных составляющих силового взаимодействия с газовой фазой, апробированной кинетической модели столкновительной дисперсной примеси, уравнений динамики соударения частиц, хорошо апробированных методах вычислительной гидромеханики, метода прямого численного моделирования (метода Монте-Карло). Установлена сходимость результатов по сетке и показана незначительная роль схемной «вязкости». Алгоритм апробирован на решении известной задачи об-

текания цилиндра. Исследована сходимость результатов по количеству моделирующих частиц. Полученные результаты являются физически объяснимыми.

### **Научная и практическая значимость**

Разработанная модель нестационарного двухфазного течения газа с частицами в решётках может быть использована для исследования других задач двухфазной газодинамики, где важны эффекты полидисперсности, рассеяния частиц при отскоке от лопаток и столкновения между частицами.

Систематические расчёты и анализ результатов показал, что в течениях в решётках доминирующую роль в формировании картины течения и полей параметров дисперсной фазы играют рассеяние частиц при отскоке от лопаток и разброс частиц по размерам. Роль же столкновений между частицами оказалась заметной только для крупных частиц. Обратное влияние примеси на течение несущего газа в исследованных диапазонах параметров задачи оказались несущественным.

Метод расчёта движения частиц, столкновений частиц с поверхностью лопаток и алгоритм метода Монте-Карло предполагают трёхмерность и могут быть использованы при моделировании трёхмерных двухфазных течений.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Математическая модель нестационарного двухфазного течения газа с твёрдыми частицами в системе решёток "ротор-статор" с одновременным учётом полидисперсности, рассеяния при отскоке от лопаток и столкновений между частицами, а также обратного влияния дисперсной примеси на течение несущего газа.
2. Численная модель для расчёта двухфазных течений в решётках на основе уравнений Эйлера, Навье–Стокса и Рейнольдса для несущего газа и лагранжевого и кинетического описания примеси с учётом названных выше эффектов.
3. Результаты расчётов и анализ относительной роли факторов случайной природы (разброс частиц по размерам, рассеяние при отскоке от поверхности лопаток, хаотизация движения примеси из-за столкновений между частицами), а также обратного влияния примеси на газовую фазу в рассмотренной задаче.

### **Апробация работы**

Результаты, представленные в диссертации, докладывались на следующих российских и международных конференциях и других форумах:

- [1] XV Международная конференция по вычислительной механике и современным прикладным программным средствам (ВМСППС`2007) (Крым, Алушта, 2007);
- [2] Всероссийский семинар по аэрогидродинамике (Санкт-Петербург, 2008);
- [3] 8th World Congress on Computational Mechanics WCCM8 / 5th European Congress on Computation Methods in Applied Sciences and Engineering (EC-COMAS 2008) (Venice, Italy, 2008);

- [4] 7th EUROMECH Fluid Mechanics Conference (EFMC 7) (Manchester, United Kingdom, 2008);
- [5] XVII Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева, "Проблемы газодинамики и тепломассообмена в аэрокосмических технологиях" (г. Жуковский, 2009);
- [6] 3rd European Conference for Aero-Space Sciences (EUCASS 2009) (Paris–Versailles, France, 2009);
- [7] III Международная научно-техническая конференция "Авиадвигатели XXI века" (Москва, 2010);
- [8] 5th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECCOMAS CFD 2010) (Lisbon, Portugal, 2010);
- [9] VII всероссийская научная конференция "Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики" (Томск, 2011);
- [10] X Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (ВСФПТМ) (Нижний Новгород, 2011);
- [11] Международная научная конференция по механике "Шестые Поляховские чтения" (Санкт-Петербург, 2012);
- [12] XVI International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2012) (Казань, 2012);
- [13] 5th European Conference for Aero-Space Sciences (EUCASS 2013) (Munich, Germany, 2013);
- [14] 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS 2014) (St.Petersburg, 2014);
- [15] XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (ВСФПТМ) (Казань, 2015);
- [16] XXIV Всероссийский семинар с международным участием по струйным, отрывным и нестационарным течениям" (Новосибирск, 2015);
- [17] Семнадцатая международная школа-семинар "Модели и методы аэродинамики" (Евпатория, 2017).

### **Публикации**

Результаты диссертации представлены в 19 публикациях: в 2-х статьях в изданиях из Перечня ВАК [1] и [2], в 2-х статьях, индексируемых в Scopus [3] и Web of Science [4], в статье в рецензируемом издании избранных трудов Европейской конференции EUCASS [5], в 7-ми статьях в сборниках трудов различных научных форумов [6–12] (тезисы здесь не учитываются), в 7-ми публикациях тезисов докладов [13–19].

### **Личный вклад автора в совместных публикациях**

В совместных публикациях автору принадлежит математическая постановка задач, алгоритмы расчёта течений несущего газа и примеси, программная реализация алгоритмов, результаты численного моделирования и их постпроцессорная обработка, участие в обсуждении и анализе результатов. В работах в

соавторстве с научным руководителем [1–12], [14–19] Ю.М. Циркунову принадлежит выбор направления исследований, общая постановка и методология решения задач, анализ совместно с автором диссертации численных результатов. В работах [3], [5], [8], [10], [15] и [17] С.В. Панфилову принадлежит алгоритм расчёта столкновения несферических частиц с твёрдой поверхностью. В работе [12] М.А. Лобановой принадлежат результаты расчёта вихревой структуры следа за самолётом (в диссертацию не вошли). В работе [17] А.Н. Волкову принадлежат результаты обтекания цилиндра (в диссертацию не вошли). В работе [18] О.В. Маракуевой принадлежат результаты расчёта течения чистого газа в модельном компрессоре авиадвигателя на основе упрощённой постановки задачи (в диссертацию не вошли). Все основные результаты, вошедшие в диссертацию, принадлежат автору.

### Структура и объём диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, и списка литературы из 162 наименований. Общий объём диссертации составляет 149 страниц, включая 52 рисунка и 3 таблицы.

## Содержание работы

Во **Введении** дана краткая характеристика работы, описаны цели и задачи исследования, положения, выносимые на защиту, структура диссертации, приведены данные об апробации работы и публикациях по теме диссертации.

В **Главе 1** дан обзор литературы по исследованию течений чистого газа и двухфазных течений газа с частицами в решётках, венцах осевых турбомашин (компрессорах и других элементах проточного тракта авиадвигателей). Кратко описана история вопроса, а также современные подходы к моделированию течений газа и примеси. Обоснована актуальность темы. Приведена схема течения и дана физическая постановка задачи.

Рассматривается двумерное течение в системе двух решёток (рис. 1), первая из которых движется (ротор), а вторая неподвижна (статор). Шаги обеих решёток  $s = 70$  мм приняты одинаковыми, хорда лопаток профилей  $l = 100$  мм.

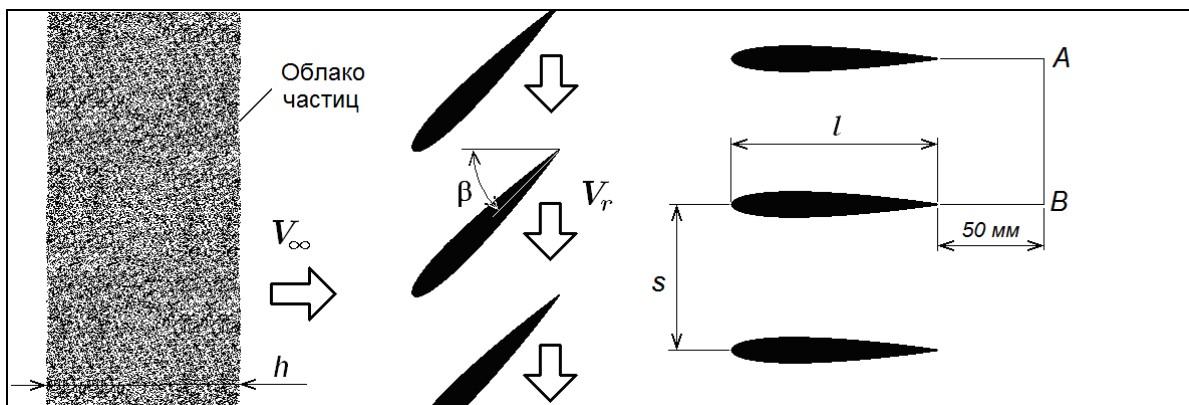


Рис. 1. Схема течения

В невозмущённом набегающем потоке газа имеется однородное облако взвешенных частиц (шириной  $h = 500$  мм). В процессе обтекания обеих решёток частицы, будучи более инерционными, чем несущий газ, сталкиваются с лопатками (профилями) и отскакивают. При достаточно высокой концентрации примеси отскочившие частицы сталкиваются с падающими, что приводит к хаотизации движения дисперсной фазы. Реальные частицы (песок или вулканический пепел) всегда имеют разброс по размерам. При движении облака частиц в решётках происходит перемешивание фракций. Частицы также не являются строго сферическими, поэтому при отскоке от лопаток происходит их хаотическое рассеяние. Одной из важнейших целей работы является исследование перестройки первоначально однородного облака частиц в процессе движения через систему решёток и ранжирование влияния различных факторов на динамическое поведение примеси.

В **Главе 2** подробно описаны математические постановки задач о течении несущего газа в решётках и численный метод их решения. Рассматривается три модели течения: (1) течение невязкого и нетеплопроводного газа, которое описывается уравнениями Эйлера; (2) течение вязкого газа, описываемое уравнениями Навье–Стокса и (3) модель турбулентного течения, описываемая уравнениями Рейнольдса с использованием  $k-\omega$  SST модели турбулентности Ментера (версия 2003 г.). В каждом случае в уравнения входят слагаемые, описывающие воздействие дисперсной примеси на газовую фазу. Приведены замкнутые системы уравнений. Уравнения законов сохранения записаны в декартовой системе координат в консервативной форме, которая использовалась для построения алгоритма расчёта на основе метода конечного объема.

Расчётная область состоит из двух блоков, каждый из которых охватывает одну лопатку роторной или статорной решётки (рис. 2).

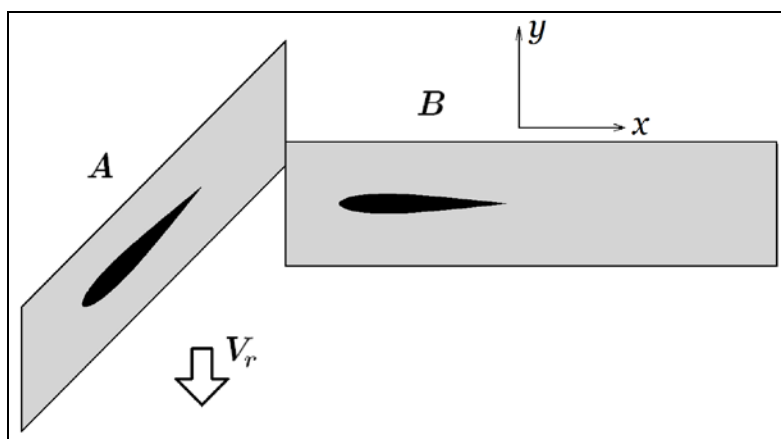


Рис. 2. Вид расчётной области

При постановке граничных условий предполагается, что при обтекании лопаток не возникают обширные отрывные зоны, которые распространялись бы на несколько шагов решёток. В этом случае на верхней и нижней границах каждого блока можно ставить условия периодичности по пространству, которые использовались в расчётах. На входной границе подвижного блока направление



вектора скорости считалось нормальным к границе и задавались значения энтропийной функции  $\vartheta = p/\rho^\gamma$  и полной энтальпии, а давление экстраполировалось на границу из расчётной области. На выходной границе неподвижного блока задавалось статическое давление (на основе экспериментальных данных для компрессора низкого давления типичного турбореактивного авиадвигателя), плотность и компоненты скорости экстраполировались из расчётной области. Такая «техника» задания условий полностью соответствует дозвуковому характеру течения и его свойствам, исходя из инвариантов Римана. На границе подвижного и неподвижного блоков использовалась специальная процедура согласования решений в каждом из блоков. На поверхности лопаток для всех моделей течения газа ставились условия непротекания. Для уравнений Навье–Стокса и Рейнольдса ставились также условия прилипания. На поверхности лопаток задавалась постоянная температура, равная температуре невозмущённого потока. Для уравнений Рейнольдса на входной границе дополнительно задавалась интенсивность турбулентности и турбулентная вязкость. В качестве начальных условий во всей расчётной области задавались параметры невозмущённого потока.

В каждом из блоков была построена неструктурированная расчётная сетка, которая сгущается к профилям лопаток и в следах за ними. Вблизи поверхности лопаток для корректного разрешения пограничного слоя используются четырёхугольные ячейки, вне пограничного слоя треугольные. В поперечном направлении на пограничный слой приходится около 20 ячеек. Общее количество ячеек сетки в обоих блоках в большинстве расчётов было около 250 тыс. Исследование сходимости результатов по сетке показало, что этого количества достаточно для получения решения с высокой точностью. Узлы сеток в каждом из блоков расставлены таким образом, что если совместить верхнюю и нижнюю границы, то узлы совпадут, что позволяет упростить процедуру реконструкции газодинамических параметров на границе.

Для численного интегрирования исходных уравнений в частных производных использовался метод конечного объема. При вычислении «невязких» потоков консервативных переменных через грани соседних ячеек сетки сначала параметры газа с каждой стороны грани определялись на основе билинейной реконструкции газодинамических параметров в каждой из ячеек, а затем применялась хорошо зарекомендовавшая себя схема Роу (Roe, 1981). «Вязкие» потоки через грани ячеек вычислялись с помощью центральных разностей. Численный метод обеспечивал второй порядок аппроксимации по времени и пространству.

В **Главе 3** описаны использованные модели течения дисперсной фазы (лагранжева модель для бесстолкновительной примеси и кинетическая модель для столкновительной), модели столкновений частиц с лопатками решёток, алгоритм задания размеров частиц в расчётах при заданном законе их распределения по размерам, численный метод интегрирования уравнений движения частиц и метод Монте-Карло.

При рассмотрении движения частиц в потоке несущего газа они считаются сферическими. Модель движения при лагранжевом методе их описания включает уравнение импульсов, момента импульсов и энергии, а также кинематическое соотношение, связывающее скорость движения и координаты частицы. В силовом взаимодействии частиц с несущим газом учитываются сила аэродинамического сопротивления и поперечная сила Магнуса, которая важна при относительном поступательном движении вращающейся частицы (сильное вращение возникает при касательных ударах о лопасти решёток и столкновениях частиц друг с другом). Другие составляющие межфазной силы (сила Сэфмана, эффект присоединенной массы, наследственная сила Бассэ и др.) в рассматриваемых диапазонах параметров (числа Рейнольдса в поступательном и вращательном движении частиц, число Стокса, отношение плотностей газа и вещества частиц и др.), как показали оценки, несущественны. Коэффициент аэродинамического сопротивления вычислялся по формулам Хендерсона, учитывающим инерционность и сжимаемость газа при обтекании частицы (эти формулы включают также эффекты разреженности и отличия в температурах газа и частицы, которые в рассматриваемой задаче несущественны). Для силы Магнуса использованы формулы, объединяющие точное решение при малых вращательных числах Рейнольдса и эмпирические зависимости при умеренных и больших числах Рейнольдса частицы. В программной реализации теплообмена частицы с газовой фазой описывается через интегральный коэффициент теплоотдачи, вычисляемый по известной полуэмпирической формуле Кавано–Дрейка. В данной работе разница температур газа и частиц мала и ее влияние на коэффициент сопротивления не учитывалось.

Столкновения частиц друг с другом и с лопатками рассматривались в трёхмерной постановке. При расчёте параметров примеси методом Монте-Карло расчётная область для частиц также была трёхмерной. Её толщина вдоль оси  $z$  выбиралась из условия инвариантности решения. На боковых границах этой области ставились условия периодичности по  $z$  для частиц.

Для описания ударного взаимодействия частиц с лопатками использованы две модели, основанные на уравнениях сохранения импульса и момента импульса частицы при соударении и задании коэффициентов восстановления нормальной и касательной компонент вектора скорости частицы. Первая – полуэмпирическая модель (двумерная и ее трёхмерный вариант) использовалась для сферических частиц с привлечением опытных данных для коэффициентов восстановления нормальной и касательной компонент вектора скорости центра масс частицы (Лашков, 1991). Эти данные описывают зависимость коэффициентов от угла и скорости удара. Во второй модели использовались постоянные коэффициенты восстановления указанных компонент скорости, но не для центра масс частицы, а для точки её контакта в момент удара. Вторая модель использовалась для изометрических частиц несферической формы (эллипсоид вращения, прямоугольная призма и прямоугольная призма со срезанными вершинами) при отскоке от лопаток, так как для таких частиц отсутствуют надёжные данные о коэффициентах восстановления. В этой модели пространственная ориентация частицы перед столкновением считается равновероятной.

Интегрирование уравнений движения частиц осуществлялось с помощью метода предиктор-корректор.

Динамика столкновительной примеси моделировалась методом Монте-Карло. Использовался алгоритм (Волков, Циркунов, 2001), являющийся вариантом алгоритма мажорантной частоты в динамике разреженного газа (Иванов, Рогазинский, 1988).

В столь общем виде модель, описывающая динамическое поведение дисперсной фазы в решётках профилей описана и использована впервые.

В **Главе 4** представлены результаты численного моделирования нестационарных течений газа и систематического численного исследования течения примеси в решётках, дан сравнительный анализ роли рассмотренных случайных факторов на динамику, картины течения и профили концентрации примеси. Принятые геометрические параметры решёток и поперечная скорость роторной решётки типичны для входной ступени компрессора низкого давления авиадвигателя. Расчёты были выполнены для двух значений скорости невозмущённого потока:  $V_\infty = 200$  м/с (условно крейсерский режим полета) и 100 м/с (режим взлёта или посадки). Для последнего характерно возникновение отрыва потока от лопаток и образование зон возвратно-циркуляционных течений в пределах одного шага решёток. Поперечная скорость подвижной решётки была равна  $V_r = 150$  м/с.

Сравнение полей параметров несущего газа для моделей Эйлера, Навье–Стокса и Рейнольдса на достаточно мелкой сетке показало, что в первом случае энтропийная функция практически постоянна во всем поле течения, что говорит о малой схемной «вязкости» метода расчёта. Решение уравнений Навье–Стокса (псевдо-прямое численное моделирование) даёт значительно более подробную вихревую структуру потока, чем решение уравнений Рейнольдса, в котором вихревая структура следов за лопатками полностью «размазана». Течение примеси также исследовалось для всех трёх моделей течения несущего газа. Однако здесь, на наш взгляд, более корректно использовать для несущего газа уравнения Навье–Стокса, так как в этом случае получается не осреднённое, а актуальное поле течения газа, а в модель межфазного взаимодействия в уравнения движения частиц входят именно актуальные параметры несущей среды. Поэтому в диссертации приводятся и обсуждаются особенности поведения примеси преимущественно для полей течения газовой фазы, полученные на основе уравнений Навье–Стокса. В расчётах варьировались радиус частиц ( $r_p = 5, 10$  и  $20$  мкм, что при  $V_\infty = 200$  м/с соответствует числам Стокса  $Stk = 2.46, 9.84$  и  $39.36$ ), форма частиц в модели их соударения и рассеяния при отскоке от лопаток (рассмотрены сферические, эллипсоидальные и призматические частицы) и объёмная концентрация примеси  $\alpha_\infty = 10^{-5} - 10^{-3}$ .

В качестве примера на рис. 3 и 4 представлены мгновенные картины распределения дисперсных частиц для  $V_\infty=200$  м/с и осреднённые по интервалу времени  $4s/V_r$  профили концентрации на линии  $AB$  (см. рис. 1).

Анализ численных результатов показал, что поведение частиц в решётках существенно зависит от размера частиц. Частицы небольшого размера образу-

ют узкие слои с высокой концентрацией, которые представляют эрозионную опасность для последующих элементов проточного тракта. С ростом размера частиц, максимальная величина концентрации снижается. Крупные частицы, отскакивая от лопаток, могут впоследствии столкнуться не только с соседними по решётке лопатками, но и с более удалёнными, что усложняет картину интерференции профилей решёток через дисперсную фазу.

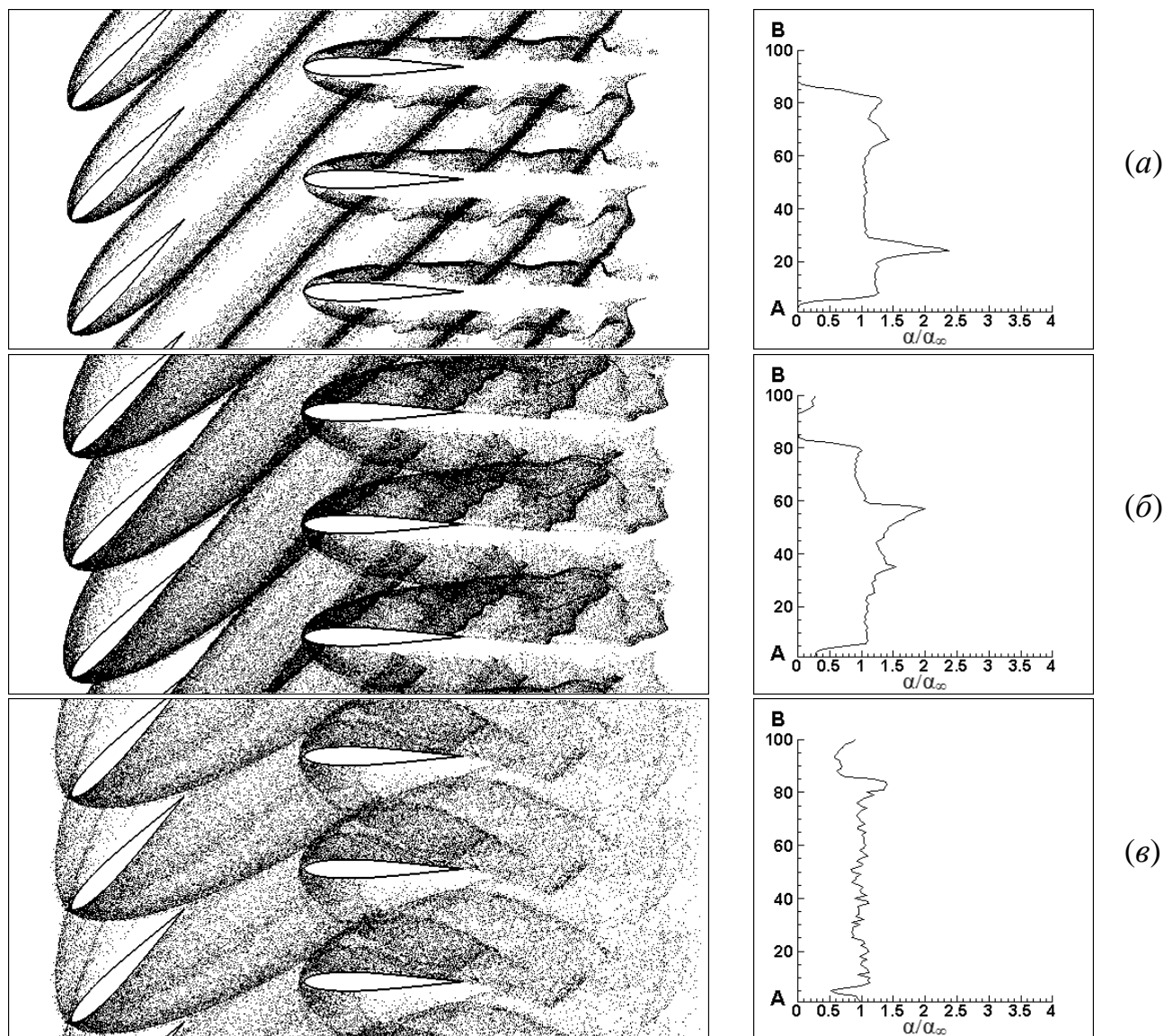


Рис. 3. Мгновенные картины распределения монодисперсных сферических частиц в потоке (слева) и осреднённые профили относительной объёмной концентрации примеси на линии  $AB$  на рис 1 (справа): (а) –  $r_p = 5$  мкм ( $Stk=2.46$ ), (б) –  $r_p = 10$  мкм ( $Stk=9.84$ ), (в)  $r_p = 20$  мкм ( $Stk=39.36$ ).

Из полученных результатов следует, что учёт таких реальных эффектов случайной природы, как полидисперсность примеси и рассеяние несферических частиц при отскоке, приводит к качественной перестройке распределения частиц, когда слои с высокой концентрацией примеси практически полностью размываются. С практической точки зрения данный результат отчасти снимает остроту проблемы эрозионного воздействия высокоскоростного потока реаль-

ных частиц, которые всегда несферические, на лопатки и последующие элементы тракта турбомашин.

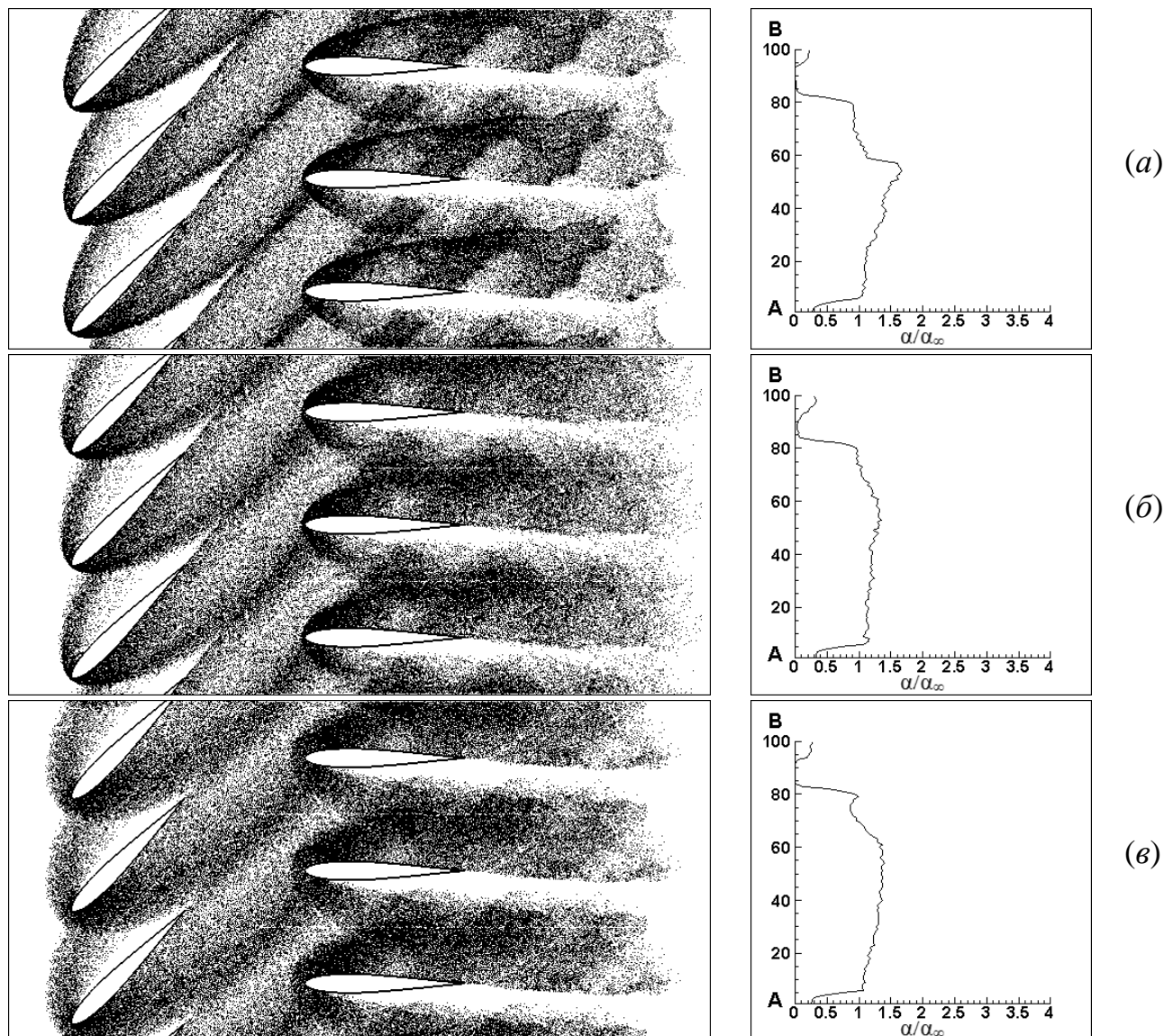


Рис. 4. Мгновенные картины распределения частиц в потоке (слева) и осреднённые профили относительной объёмной концентрации на линии  $AB$  на рис. 1 (справа): (а) – монодисперсные сферические частицы радиуса  $r_p = 10$  мкм,  $\alpha_\infty = 10^{-3}$ , учитываются столкновения между частицами, (б) – полидисперсные сферические частицы, наиболее вероятный радиус частиц 10 мкм, параметр дисперсии в логарифмически-нормальном законе распределения  $\sigma = 1.2$ ,  $\alpha_\infty = 10^{-4}$ , примесь бесстолкновительная, (в) – призматические частицы с отношением рёбер 0.8, полудлина большего ребра 10 мкм, примесь бесстолкновительная.

Роль столкновений между частицами в перераспределении дисперсной фазы в потоке в случае достаточно мелких частиц ( $r_p = 5$  и  $10$  мкм) оказалась малой даже при объёмной концентрации  $\alpha_\infty = 10^{-3}$ , которая соответствует одинаковому порядку массовых концентраций фаз. Для крупных частиц ( $r_p = 20$

мкм) при той же их концентрации в невозмущенном потоке роль межчастичных столкновений существенна (см. рис. 5) и сравнима с первыми двумя эффектами.

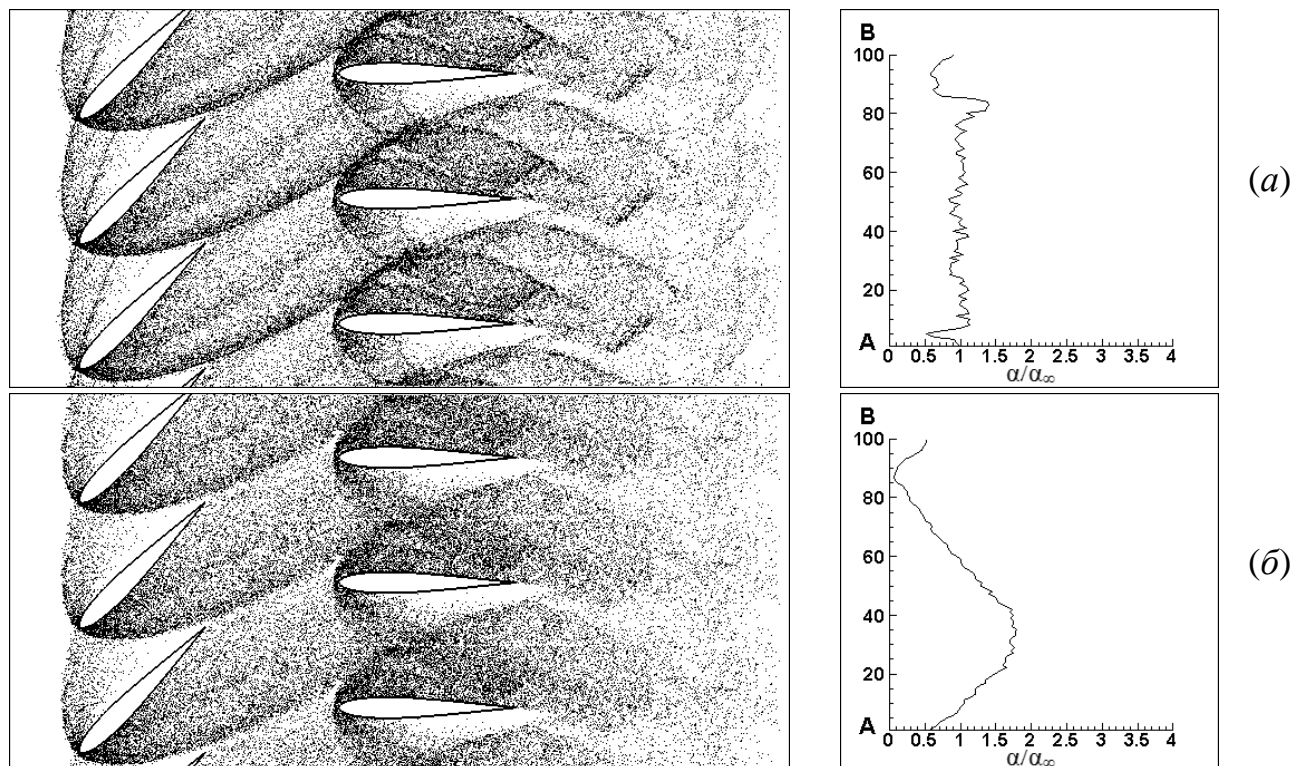


Рис. 5. Мгновенные картины распределения монодисперсных сферических частиц радиуса  $r_p = 20$  мкм (слева) и осреднённые профили относительной объёмной концентрации на линии  $AB$  на рис. 1 (справа): (а) – столкновения между частицами не учитываются, (б) – столкновения между частицами учитываются,  $\alpha_\infty = 10^{-3}$ .

Эффект обратного влияния примеси на течение газовой фазы во всех случаях оказался несущественным.

Как следует из результатов выполненных систематических расчётов, для физически корректного моделирования динамики примеси во входной ступени компрессора авиадвигателя в реальных условиях необходимо в первую очередь учитывать полидисперсность примеси и рассеяние частиц при отскоке от лопаток. Эффект столкновений между частицами при их фиксированной концентрации в невозмущённом потоке и степени упругости соударения с лопатками зависит от их размеров. Обратное влияние примеси на течение газовой фазы играет значительно меньшую роль.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационного исследования:

1. Разработаны и реализованы в виде компьютерной программы математические модели нестационарного двухфазного течения сжимаемого газа с дисперсными частицами в системе "ротор-статор" решёток профилей. Модели основаны на континуальном описании течения несущего газа и дискретном описании дисперсной фазы. Для несущего газа рассмотрены модели Эйлера, Навье–Стокса и Рейнольдса с  $k-\omega$  SST моделью турбулентности. В уравнения введены члены, описывающие обратное воздействие примеси на несущий газ. При моделировании движения дисперсной фазы впервые одновременно учтены следующие эффекты случайной природы: разброс частиц по размерам, рассеяние частиц при отскоке из-за их несферической формы и столкновения между частицами.
2. Численные модели течений несущего газа основаны на методе конечного объёма, билинейной интерполяции газодинамических параметров в ячейках сетки, схеме Роу для расчёта "вязких" потоков консервативных переменных через грани ячеек сетки, вычислении "вязких" потоков с помощью центральных разностей и специальной процедуре согласования решений между блоками роторной и статорной решёток. В результате методических расчётов показано, что в разработанном алгоритме роль схемной "вязкости" при аппроксимации конвективных членов в исходных уравнениях мала, если в потоке отсутствуют обширные области отрыва и крупномасштабная вихревая структура, что позволяет с достаточным доверием относиться к результатам решения уравнений Навье–Стокса и Рейнольдса. Компьютерная программа была также протестирована на задаче поперечного обтекания цилиндра при умеренных числах Рейнольдса и получено хорошее согласие с известными экспериментальными данными.
3. Численные расчёты движения дисперсной фазы в системе решёток основаны на лагранжевом описании бесстолкновительной примеси и на методе Монте–Карло для столкновительной. При расчёте столкновений частиц с лопатками (профилями) использовалась теория удара с учётом неупругости ударного взаимодействия и трения в области контакта. При моделировании рассеяния отражённых частиц несферической формы при отскоке от лопаток задавалась случайная ориентация каждой частицы перед столкновением. Распределение частиц по размерам в невозмущённом потоке описывалось логарифмически-нормальным законом.
4. Исследованы течения несущего газа для двух режимов: расчётного ( $V_\infty=200$  м/с), соответствующего скорости крейсерского полета летательного аппарата, и нерасчётного ( $V_\infty=100$  м/с), соответствующего взлёту или посадке. Наряду с построением полей параметров (числа Маха, энтропийной функции, давления) использовался метод визуализации с помощью безынерционных частиц-маркеров. Этот метод позволил выявить "тонкую" структуру потока. В первом случае ( $V_\infty=200$  м/с) отрывные зоны при обтекании профилей обеих решёток не возникают. Во втором случае ( $V_\infty=100$

м/с) появляются обширные зоны возвратно-циркуляционных течений, которые сносятся вниз по потоку, приводя к очень сложной нестационарной картине течения с крупномасштабной вихревой структурой.

5. В результате систематического численного исследования структуры течения примеси найдено, что во всех случаях первоначальное пространственно-однородное поле концентрации примеси становится существенно неоднородным. При этом монодисперсная примесь образует тонкие слои с высокой концентрацией (в несколько раз выше, чем в невозмущённом потоке), которые могут представлять значительную эрозионную опасность для последующих венцов и других элементов тракта турбомшины. Эффекты случайной природы "размазывают" эти слои, уменьшая эрозионную опасность. Сравнительный анализ влияния этих эффектов показал, что при рассмотренных параметрах задачи доминирующую роль в формировании картины течения примеси играют эффект рассеяния частиц из-за несферической формы при отскоке от лопаток и полидисперсность примеси. При этом роль столкновений между частицами и обратное влияние примеси на несущий газ в исследованных диапазонах скорости невозмущённого потока, размера частиц и концентрации примеси оказалась для достаточно мелких частиц (радиуса 5 и 10 мкм) очень малой даже при объёмной концентрации  $\alpha_\infty = 10^{-3}$  (что соответствует одинаковому порядку массовых концентраций газовой и дисперсной фаз), а для крупных частиц (радиуса 20 мкм) существенной, причём при указанной выше концентрации влияние столкновений сравнимо с первыми двумя эффектами. Обратное влияние примеси на течение несущего газа во всех случаях оказалось незначительным.

### **Благодарности**

Результаты исследования, вошедшие в диссертацию были получены в рамках выполнения проектов, поддержанных Российским фондом фундаментальных исследований (гранты 09-08-00888, 12-08-01282 и 15-08-07965).

### **Список публикаций по теме диссертации**

- [1] Романюк Д.А., Циркунов Ю.М. Двухфазное течение газа с частицами во входной ступени "ротор–статор" турбомшины. // Математическое моделирование, 2010, Т. 22, N 1, с. 136–144. (**Перечень ВАК**)
- [2] Циркунов Ю.М., Романюк Д.А. Течение запылённого газа в решётках профилей. // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2011. N 4(3). с. 1237–1239. (**Перечень ВАК**)
- [3] Tsirkunov Yu.M., Romanyuk D.A., Panfilov S.V. Computational simulation of two-phase gas-particle flow in an inlet "rotor–stator" stage of a turbojet engine compressor. // 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. St. Petersburg, Russia, 7–12 September, 2014. – Proc. of ICAS 2014, paper No. 2014-0856, 10 p. (**Scopus**)



[http://www.icas.org/ICAS\\_ARCHIVE/ICAS2014/data/papers/2014\\_0856\\_paper.pdf](http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2014/data/papers/2014_0856_paper.pdf).

- [4] Tsirkunov Yu.M., Romanyuk D.A. Computational Fluid Dynamics / Monte-Carlo simulation of dusty gas flow in a "rotor–stator" set of airfoil cascades. // Progress in Propulsion Physics. Vol. 8 (Eds.: M. Calabro, C. Bonnal, O. Haidn and S. Frolov). – Torus Press & EDP Sciences, 2016, pp. 427–444. DOI: 10.1051/eucass/201608427. (**Web of Science**)
- [5] Tsirkunov Yu., Romanyuk D. & Panfilov S. Effects of particle mixing and scattering in the dusty gas flow through moving and stationary cascades of airfoils. // Progress in Propulsion Physics. Vol. 2 (Eds.: L. DeLuca, C. Bonnal, O. Haidn and S. Frolov). – EDP Sciences & Torus Press, 2011, pp. 459–474. DOI: 10.1051/eucass/201102459.
- [6] Романюк Д.А., Циркунов Ю.М. Численное моделирование двухфазного течения газа с частицами во входной ступени "ротор–статор" турбомшины. // Материалы XV международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным средствам ВМСППС`2007, Алушта, 25–31 мая 2007г. – М.: Вузовская книга, с. 435–436.
- [7] Романюк Д.А., Циркунов Ю.М. Численное моделирование двухфазного течения газа с частицами во входной ступени турбомшины. // Труды XVII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева "Проблемы газодинамики и тепломассообмена в аэрокосмических технологиях". г. Жуковский, 25–29 мая 2009 г. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009, Т. 2, с. 261–264.
- [8] Tsirkunov Yu., Romanyuk D. & Panfilov S. Effects of particles' mixing and scattering in the dusty gas flow through the moving and stationary cascades of airfoils. // Third European Conference for Aero-Space Sciences. Paris–Versailles, France, 6–9 July 2009. – CD-ROM Proc. of EUCASS 2009 (Ed. M.L. Riethmuller), paper No. 297, 12 p.
- [9] Romanyuk D.A., Tsirkunov Yu.M. Numerical simulation of unsteady dusty gas flow through the moving and stationary cascades of airfoils. // Fifth European Conference on Computational Fluid Dynamics, Lisbon, Portugal, 14–17 June 2010. CD-ROM Proc. of ECCOMAS CFD 2010 (Eds. J.C.F. Pereira and A. Sequeira), paper No. 1063, 20 p.
- [10] Циркунов Ю.М., Романюк Д.А., Панфилов С.В. Течение запылённого газа во входном компрессоре турбореактивного двигателя. // Авиадвигатели XXI века: Материалы конференции. Москва: ЦИАМ, 2010. – CD-ROM, с. 123–126.
- [11] Tsirkunov Yu.M., Romanyuk D.A. CFD/Monte Carlo simulation of dusty gas flow in a "rotor–stator" set of airfoil cascades. // 5th European Conference for Aero-Space Sciences. Munich, Germany, 1–5 July 2013. – CD-ROM Proc. of EUCASS 2013 (Eds.: Oskar J. Haidn, Walter Zinner, Max Calabro), paper No. 373, 12 p.

- [12] Циркунов Ю.М., Романюк Д.А., Лобанова М.А. О моделировании течений с крупномасштабной вихревой структурой. // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: Сборник докладов (Казань, 20–24 августа 2015 г.). / Сост. Д.Ю. Ахметов, А.Н. Герасимов, Ш.М. Хайдаров, под ред. Д.А. Губайдуллина, А.М. Елизарова, Е.К. Липачёва. – Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2015. с. 4026–4028.
- [13] Романюк Д.А. Численное моделирование вязких двухфазных течений в областях с подвижными границами. // Всероссийский семинар по аэрогидродинамике: Тезисы докладов. Санкт-Петербург, 5–7 февраля 2008 г. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2008, с. 109.
- [14] Romanyuk D., Tsirkunov Yu. Dusty gas flow through the moving and stationary cascades of airfoils. // 8th World Congress on Computational Mechanics WCCM8 / 5th European Congress on Computation Methods in Applied Sciences and Engineering. Venice, Italy, 30 June – 4 July 2008. – CD-ROM Proc. of WCCM8 / ECCOMAS 2008, Abstracts of papers (Eds.: B.A. Schrefler and U. Perego), abstract No. A795.
- [15] Tsirkunov Yu., Romanyuk D. & Panfilov S. Two-phase gas–particle flow through a set of moving and stationary cascades of blades. // 7th EUROMECH Fluid Mechanics Conference. Manchester, United Kingdom, September 14–18, 2008. – Abstracts of papers EFMC 7, University of Manchester, 2008, p. 341.
- [16] Романюк Д.А., Циркунов Ю.М. Перемешивание и рассеяние частиц при течении запылённого газа через систему решёток. // Тезисы докладов международной научной конференции по механике "Шестые Поляховские чтения". Санкт-Петербург, 31 января – 3 февраля 2012 г. – М.: Издатель И.В. Балабанов, 2012, с. 177.
- [17] Tsirkunov Yu. M., Volkov A.N., Panfilov S.V., Romanyuk D.A. Fluid Dynamics and heat transfer in dusty gas flow over bodies: modeling and role of random effects. // XVI International Conference on the Methods of Aerophysical Research. Kazan, Russia, August 19–25, 2012. – Abstracts ICMAR 2012, Part II. (Ed.: V.M. Fomin) – Kazan, pp. 261–264.
- [18] Циркунов Ю.М., Романюк Д.А., Маракуева О.В. Отрывные двухфазные течения газа с частицами и течения чистого газа в подвижных решётках профилей и ступенях турбомашин. // Струйные, отрывные и нестационарные течения: Тезисы докладов XXIV Всероссийского семинара с международным участием. Новосибирск 11–13 ноября 2015 г. / под ред. В.М. Фомина, В.И. Запрягаева. – Новосибирск, Изд-во "Параллель", 2015, с. 166–167.
- [19] Романюк Д.А., Циркунов Ю.М. Нестационарные течения запылённого газа в решётках. // Модели и методы аэродинамики: Материалы Семнадцатой международной школы-семинара. Евпатория, 4–11 июня 2017 г. – М.: ЦАГИ, 2017. с. 147–148.