



Dedicated to the memory of Ulian Gaiikovich Pirumov

**PROCEEDINGS
OF THE XIX INTERNATIONAL CONFERENCE
ON COMPUTATIONAL MECHANICS
AND MODERN APPLIED SOFTWARE SYSTEMS**



CMMASS'2015

**24–31 May, 2015
Alushta, Crimea**



УДК 519.6:517.958:533.6
ББК 22.2:2218
М34

Издание осуществлено при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований (проект №15-08-20276г)
и Московского авиационного института
(национального исследовательского университета)

М34 **Материалы XIX Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2015), 24–31 мая 2015 г., Алушта.** — М.: Изд-во МАИ, 2015. — 760 с.: ил.

ISBN 978-5-4316-0242-9

Сборник включает в себя научные работы, отражающие современные мировые достижения в вычислительной механике, механике деформируемого твердого тела, механике жидкости, газа и плазмы, аэрокосмической механике, прикладной математике, разработке прикладных программных средств.

Для специалистов в области прикладной математики и механики, математического моделирования, информационных технологий, разработчиков современных прикладных программных систем, аспирантов и студентов старших курсов технических вузов.

Материалы XIX Международной конференции по вычислительной механике
и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2015),
24–31 мая 2015 г., Алушта

Дизайн и компьютерная верстка *Ал. А. Пярнпуу*

Подписано в печать 27.04.15. Формат 70 × 100 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 61,75
Тираж 400 экз. Изд. №323

Издательство МАИ
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии ООО «АРТИШОК продакшн»,
125476, Россия, Москва, ул. Василия Петушкова, д. 8, e-mail: info@artishok.ru

ISBN 978-5-4316-0242-9

© Московский авиационный институт
(национальный исследовательский
университет), 2015

**ХІХ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКЕ
И СОВРЕМЕННЫМ ПРИКЛАДНЫМ ПРОГРАММНЫМ СИСТЕМАМ**



ВМСППС'2015

24–31 мая 2015 г.

Алушта, Крым

Сборник включает в себя материалы Девятнадцатой Международной конференции по Вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2015), которая будет проводиться с 24 по 31 мая 2015 года на базе учебного центра «Алушта» Московского авиационного института. Конференция посвящена памяти члена-корреспондента РАН Ульяна Гайковича Пирумова (26.10.1931–24.02.2015), бывшего долгое время сопредседателем Оргкомитета конференции.

Целью конференции является обсуждение актуальных проблем вычислительной механики, современных прикладных программных систем, проблем параллельных вычислений, перспективных численных методов и разнообразных аспектов применения ЭВМ для решения задач механики деформируемого твердого тела, механики жидкости, газа и плазмы, аэрокосмической механики, наномеханики и других прикладных задач. Будут рассмотрены проблемы информационной поддержки приложений и баз данных, обсуждаются средства обработки и визуализации результатов вычислительных экспериментов и новые достижения, полученные в ходе конкретных исследований.

Материалы конференции также публикуются в журналах, указанных в перечне российских рецензируемых научных журналов ВАК: «Известия РАН. Механика жидкости и газа», «Математическое моделирование» РАН, «Вестник МАИ» и в электронных журналах «Труды МАИ» и «Физико-химическая кинетика в газовой динамике».

Организаторы конференции:

- Российская академия наук
- Министерство образования и науки РФ
- Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)
- Российский Национальный комитет по теоретической и прикладной механике
- Российский фонд фундаментальных исследований

Оргкомитет конференции

Сопредседатели: Горячева И. Г., Левин В. А., Пирумов У. Г.

Зам. председателя: Бакулин В. Н., Гидаспов В. Ю.

Ученый секретарь: Кузнецова Е. В.

Члены оргкомитета:

Александров А. А., Алешин Б. С., Алифанов О. М., Аннин Б. Д., Бабешко В. А., Баженов В. Г., Болотник Н. Н., Васильев С. Н., Ганиев Р. Ф., Гайфуллин А. М., Герашенко А. Н., Горкунов Э. С., Губайдуллин Д. А., Егоров И. В., Желтов С. Ю., Журавлев В. Ф., Индейцев Д. А., Каляев И. А., Канель Г. И., Климов Д. М., Коротеев А. А., Куликовский А. Г., Куприков М. Ю., Куржанский А. Б., Леонов А. Г., Липанов А. М., Липатов И. И., Ломакин Е. В., Маров М. Я., Матвеев А. М., Матвеев В. П., Махутов Н. А., Мельник О. Э., Микрин Е. А., Митенков Ф. М., Морозов Н. Ф., Нейланд В. Я., Нигматулин Р. И., Павленко А. Н., Петров Ю. В., Пешехонов В. Г., Попов Г. А., Псахье С. Г., Пухначев В. В., Ребров А. К., Резчиков А. Ф., Рыжов Ю. А., Себряков Г. Г., Сильников М. В., Сироткин О. С., Соломонов Ю. С., Сон Э. Е., Суржииков С. Т., Титов В. М., Федосов Е. А., Фельдман Л. П., Фомин В. М., Фомин Н. А., Фортон В. Е., Черноушко Ф. Л., Чернышев С. Л., Четверушкин Б. Н., Шевцов В. А., Шокин Ю. И., Шорин В. П., Щербатюк А. Ф., Яновский Ю. Г.

Программный комитет конференции:

Абгарян К. К., Бакулин В. Н., Бишаев А. М., Васильев А. Н., Гидаспов В. Ю., Голуб В. В., Запрягаев В. А., Зимин В. Н., Иванов И. Э., Каледин В. О., Крылов С. С., Ковеня В. М., Кузнецов Е. Б., Ломоносов И. В., Лукин В. В., Панов Ю. Н., Ревизников Д. Л., Тархов Д. А., Тишкин В. Ф.

Технический комитет конференции:

Аносова Н. П., Демидова О. Л., Дмитриев С. А., Жукова М. Е., Катасонова Е. Н., Коробовский А. В., Ларина Е. В., Пярнпуу Ал. А., Северина Н. С., Семенова А. В., Сеницкая В. В., Сиротенко С. В., Терехов И. В., Чугунков С. А.

Научные направления конференции

- А.** Теория и практика современного моделирования.
Высокопроизводительные вычисления
- В.** Информационные технологии, базы и хранилища данных.
Интеллектуальные вычисления и нейросетевые технологии
- С.** Общая механика, механика деформируемого твердого тела.
Прочность, разрушение и безопасность конструкций
- Д.** Механика жидкости, газа и плазмы.
Аэротермодинамика гиперзвуковых скоростей
- Е.** Методы и средства визуализации, системы обработки изображений
- Г.** Общие проблемы и модели механики сплошных сред
на разных масштабных уровнях
- Ж.** Биомеханика
- З.** Задачи теории управления
- И.** Аэрокосмическая механика. Проблемы создания и эксплуатации
аэрокосмической техники
- К.** Компьютерное обучение. Современные компьютерные технологии
и подготовка специалистов для ракетно-космической отрасли

СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЯ ПРИ ОБТЕКАНИИ МОДЕЛЬНОГО РПД ПОТОКОМ ВОЗДУХА

**В.А. Архипов¹, Д.Д. Аксененко², И.К. Жарова¹, А.С. Жуков¹, А.Ю. Крайнов¹,
А.В. Курбатов², А.В. Литвинов², Е.А. Маслов¹, В.В. Фараонов¹**

¹НИИПММ ТГУ, Томск, Россия;

²ОАО «ФНПЦ «Алтай», Бийск, Алтайский край, Россия

В последнее время возрастает интерес к ракетно-прямоточным двигателям (РПД), в которых сочетаются достоинства твердотопливных и воздушно-реактивных двигателей [1]. В процессе функционирования РПД изменяются геометрические характеристики проточного тракта вследствие выгорания твердотопливного заряда. Для расчета внутрибаллистических характеристик РПД необходимо знать закон скорости горения твердого топлива в потоке воздуха, который зависит от структуры потока в проточном тракте двигателя. Важным этапом при разработке РПД является моделирование полей температуры, давления и скорости обдуваемого потока в проточном тракте двигателя.

Математическое моделирование течения в проточном тракте РПД позволяет уже на этапе проектирования определить структуру потока и распределения газодинамических параметров по длине канала с учетом изменения его геометрических характеристик вследствие выгорания твердого топлива. Для оценки адекватности разрабатываемых математических моделей целесообразно проведение сравнительного анализа численных результатов и экспериментальных данных, полученных на моделях РПД.

В настоящей работе представлены результаты расчетно-теоретического и экспериментального исследования структуры воздушного потока в проточном тракте плоской модели РПД (рис. 1).

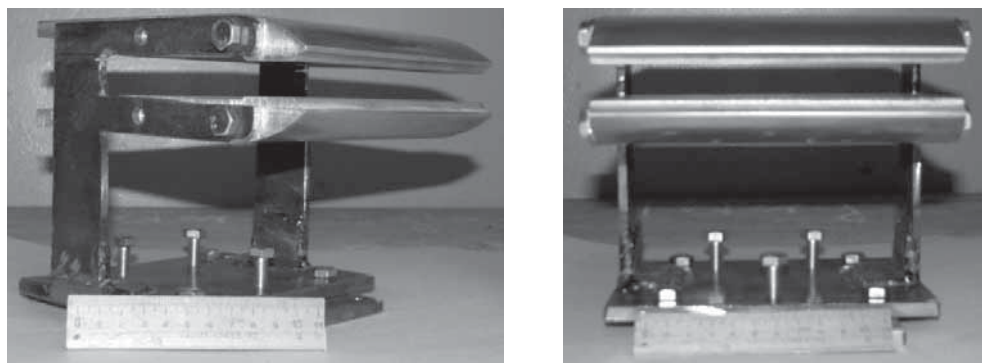


Рис. 1. Фотографии плоской модели РПД

Для разработанной модели РПД проведены эксперименты по измерению температуры, давления и визуализации процесса обтекания потоком воздуха на модельной аэродинамической установке (МАУ) [2] со временем обдува $t_k = 4,5$ с в диапазонах чисел Маха = 2–6 и температур торможения набегающего потока $T_a = 20–500$ °С. Типичные видеокadres формирования структуры потока для чисел $M = 5$, полученные с помощью высокоскоростной камеры, приведены на рис. 2.

Анализ визуализированной структуры потока показал, что для исследуемых режимов обтекания в проточном тракте плоской модели РПД развивается течение с набором косых ударных волн.

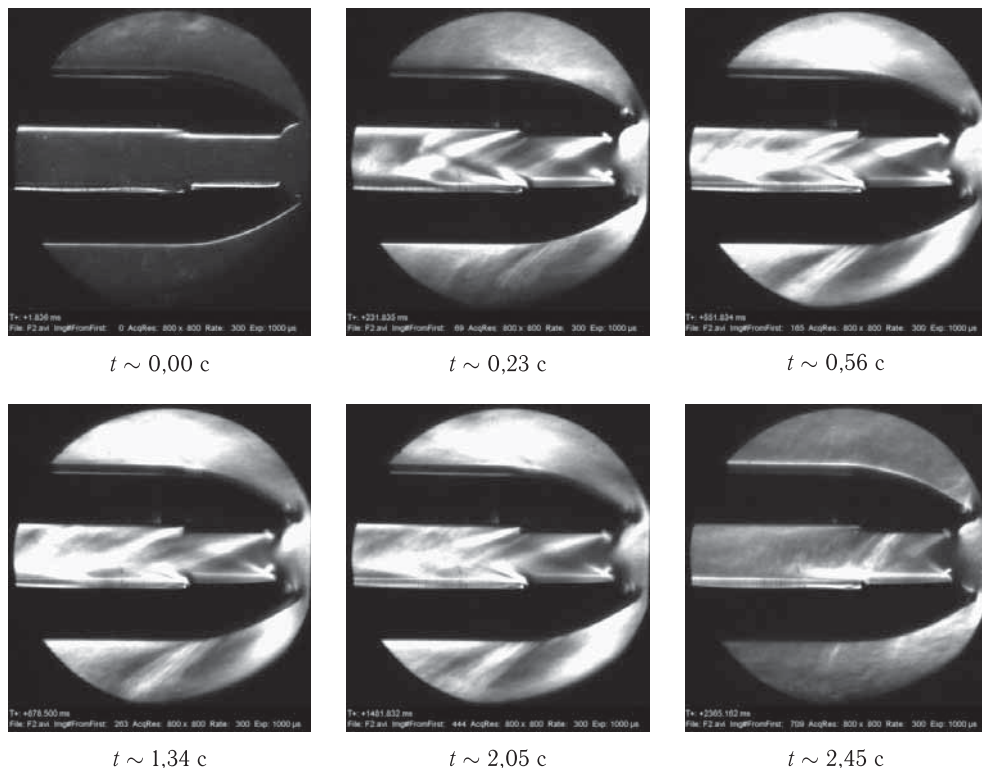


Рис. 2. Кадры видеосъемки обтекания плоской модели РПД, $M = 5$, $T_h = 400^\circ\text{C}$

Газодинамические процессы в канале модельного двигателя моделировались с использованием уравнений газовой динамики в двухмерной плоской постановке. На входе в расчетную область ставились граничные условия, соответствующие параметрам натекающего потока.

Система уравнений решалась численно методом С.К. Годунова [3] на сетке, преобразованной к форме контура модели. Расчетная область разбивалась на $N \times M$ ячеек. На границе ячеек решалась задача о распаде произвольного разрыва в параметрах газа и определялись потоки массы, импульса и энергии на границе между ячейками с учетом положения границы ячейки по отношению к осям цилиндрических координат. Численное решение системы уравнений проводилось до установления стационарного течения в проточном тракте модели и в обтекающей модель потоке.

На основе физико-математической модели газодинамических процессов в модели с учетом взаимодействия ее корпуса с набегающим и обтекающим потоком воздуха проведено численное моделирование газодинамических процессов течения воздуха в МАУ при обтекании плоской модели потоком воздуха с числами Маха натекающего потока в диапазоне $M = 3-5$. Получены поля распределений газодинамических параметров воздуха, обтекающего плоскую модель, и в ее проточном тракте.

Распределение газодинамических параметров и расположение ударных волн и косых скачков уплотнения в проточном тракте плоской модели и во внешнем потоке согласуются с экспериментальными данными.

1. Орлов Б. В., Мазинг Г. Ю., Рейдель А. Л. и др. Основы проектирования ракетно-прямоточных двигателей для беспилотных летательных аппаратов. — М.: Машиностроение, 1967. — 424 с.
2. Звезгинцев В. И. Газодинамические установки кратковременного действия. Ч. 1. Установки для научных исследований. — Новосибирск: Параллель, 2014. — 551 с.
3. Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я., Крайко А. Н., Прокопов Г. П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. — М.: Наука, 1976. — 400 с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ КОНСОЛИДИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ЧАСТИЦ ПРИ ДВИЖЕНИИ В ПОЛЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

В. А. Архипов, А. С. Усанина

ТГУ, Томск, Россия

Задача о закономерностях движения совокупности частиц дисперсной фазы (капель, пузырьков или твердых частиц) в дисперсионной среде в гетерогенных потоках представляет интерес при формулировании адекватных физико-математических моделей процесса динамического взаимодействия частиц при взаимных столкновениях и с несущей средой, а также при решении ряда классических задач гидродинамики. В частности, в задачах очистки водоемов от примесей, требуется знать величину оптимальной концентрации осаждаемых частиц. В задачах гидроподавления пыли в угольных шахтах необходимо иметь представление о динамике облаков субмикронных капель. В задачах распространения и оседания облака пыли при катастрофических явлениях техногенного или природного характера (извержение вулкана, промышленные взрывы и т. п.) важно определить принципы взаимодействия частиц в облаке и их поведение в атмосферных условиях.

Одним из параметров, определяющих закономерности движения частиц дисперсной фазы в потоке, является коэффициент сопротивления. Наиболее обширные результаты по коэффициенту сопротивления получены для одиночных частиц. С. Соу [1] в своей монографии утверждает: «Если объемная концентрация твердых частиц C_V достаточно велика (толщина пограничного слоя среды превышает расстояние между частицами), то коэффициент сопротивления для одиночных частиц не применим для облака частиц». Соу С. был первым, кто заметил то, что выражение для скорости падения группы частиц будет отличаться от скорости осаждения одиночной частицы значением коэффициента сопротивления C_D .

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования процесса гравитационного осаждения совокупности твердых сферических частиц в вязкой жидкости в области малых чисел Рейнольдса ($Re < 1$). В рамках проводимых исследований проанализировано влияние начальных параметров эксперимента (количества, начальной объемной концентрации) на основные динамические характеристики облака частиц.

Исследование проводилось на установке, состоящей из вертикально установленной прозрачной кюветы с плоскопараллельными стенками, наполненной глицерином, системы сброса частиц и системы визуализации процесса гравитационного осаждения системы твердых сферических частиц. В качестве частиц использовались стальные шарики диаметром $d = 0,2$ мм и $d = 0,7$ мм. Кювета размером $300 \times 300 \times 900$ мм (объемом 81 л) изготовлена из оптического стекла толщиной 15 мм [2]. В экспериментах величина начальной концентрации варьировалась в диапазоне $C_{V0} = 0,023-0,47$.