Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Московский физико-технический институт (государственный университет)

МФТИ

60

60-я НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МФТИ

Москва,
Долгопрудный,
Жуковский
2017

ТРУДЫ 60-Й ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ МФТИ

20-26 ноября 2017 года

Аэрокосмические технологии

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)»

Труды
60-й Всероссийской научной конференции МФТИ

20 - 26 ноября 2017 года

Аэрокосмические технологии

Москва Долгопрудный Жуковский
МФТИ
2017

УДК 629.7
ББК 39.5
Т78

Т78 **Труды 60-й Всероссийской научной конференции МФТИ.**
20–26 ноября 2017 г. Аэрокосмические технологии. -
М.: МФТИ, 2017. - 372 с.
ISBN 978-5-7417-0646-6

В сборник трудов включены результаты оригинальных исследований студентов, аспирантов, преподавателей и научных сотрудников Физтех-школы аэрокосмических технологий МФТИ и дружественных учебных и научных организаций, представленные в виде докладов на 60-й Всероссийской научной конференции МФТИ.

В сборнике представлены статьи по аэрокосмической тематике Физтех-школы аэрокосмических технологий: аэрофизика и прочность космических и летательных аппаратов, физика полёта, физические процессы в ракетных двигателях, космическая энергетика, наблюдение Земли из космоса, теоретические и прикладные вопросы аэрогидромеханики, механики сплошных сред и механики твёрдого тела, управление разнообразными механическими системами, включая космические. Также включены работы по физике геосистем и физике моря, имеющие как теоретический, так и прикладной характер.

Значительная часть материалов отражает инновационный образовательный процесс и содержит результаты, полученные студентами при выполнении дипломных работ на степень бакалавра и магистра.

УДК 629.7
ББК 39.5

ISBN 978-5-7417-0646-6

© Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(государственный университет)», 2017

Оглавление

Програмный комитет конференции……18

Организационный комитет конференции……..……..19

Рецензенты научных докладов……20

Секция управления динамическими системами 21

А.А. Яковенко

Моделирование контактного взаимодействия захватывающего инструмента с биологической тканью 21

М.Ю. Шавин

Управление беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) с поворотными роторами.....23

А.С. Шамаев, В.В. Шумилова

Расчет собственных частот колебаний многослойной упруго-жидкой среды с помощью её усредненной модели.....24

А.А. Гавриков, Г.В. Костин

Управление процессами теплообмена в цилиндрическом теле 26

Л.Д. Акуленко, А.А. Гавриков

Об управлении движениями одномерной стержневой системы с граничной нагрузкой.....28

А.А. Гавриков

О решении задач на собственные значения для линейных гамильтоновых систем 30

Л.Ю. Меркушов

Сравнение дифракционной эффективности амплитудных и фазовых голограмм.....32

М. Алхаддад

Нечеткое управление движением колесного мобильного робота при наличии препятствий.....32

Е.Г. Земцова

Асимптотический анализ в задаче об оценке стоимости опциона в модели со случайной волатильностью 35

В.В. Черник

Анализ устойчивости и граничной управляемости системы, описываемой уравнением трубопровода с движущейся жидкостью 36

А.С. Шамаев, Д.Ю. Князьков

Решение интегральных уравнений в задаче моделирования ползучей слоистой среды.....38

Д.Ю. Князьков, Г.В. Костин

Моделирование управляемого нагрва цилиндрического тела при наличии неравномерного конвективного теплообмена с окружающей средой 39

Д.Ю. Князьков

Расчет дифракции плоской волны на трехмерном периодическом в двух направлениях слое произвольной структуры 40

К.В. Кукуджанов, А.Л. Левитин

Об изменениях поврежденности металла под действием высокоэнергетического электромагнитного поля 41

И.М. Ананьевский, Т.А. Ишханян
Управление платформой с осцилляторами в условиях неопределенности 43
Т.С. Зароднюк, И.С. Гусева, Е.А. Финкельштейн, А.Ю. Горнов
Методика генерации двумерных тестовых задач оптимального управления на основе алгоритмов аппроксимации множества достижимости 45
А.В. Шевченко
Анализ устойчивости квадратных слоистых пластин при неоднородном нагреве 47
А.М. Нунупаров
Построение модели термомеханического актюатора для шагающего робота 49
С.А. Лычёв, Г.В. Костин, К.Г. Койфман
Структурная оптимизация многослойных гиперупругих цилиндров 50
Секция физической механики 53
И.А. Чепрасов, В.П. Коновалов
Диссоциация воздуха за гиперзвуковой ударной волной 53
В.С. Морозов, Э.Е. Сон
Моделирование технологии получения чистого алюминия 54
В.А. Панов, Л.М. Василяк, С.П. Ветчинин, В.Я. Печеркин
Влияние поверхностных и объёмных пузырьков на развитие электрического разряда в воде 56
Секция космических летательных аппаратов 58
А.Ю. Бондаренко, З.М. Курашов
Исследование динамических характеристик типовой ступени РН с учетом гидроупругих свойств топливных баков 58
Т.А. Ивашова, Е.С. Хнырева
Проверка согласования строительных осей датчиков магнитометра научной аппаратуры «МАГКОМ» 59
Г.Ю. Мухаметдинов
Расчёт параметров в форкамере аэродинамических установок, использующих в качестве рабочего газа CO_2 60
Д.Е. Губанов
Гетерогенные процессы на поверхности углерода в потоке азота 60
К.И. Зайцев, А.Л. Половнев, С.Д. Пушкин
Экспериментальное определение акустических свойств материалов, составляющих многослойную трансформируемую оболочку космических модулей 62
А.В. Сосин
Компьютерное моделирование обтекания вращающихся затупленных конусов с целью определения коэффициента демпфирования крена 65
Р.А. Бегалиев
Применение метода прямого статистического моделирования Монте-Карло для решения задач тепломассообмена 67
М.В. Захарова
Расчётно-экспериментальный подход к моделированию механического и прочностного поведения конструкционных материалов с использованием метода томографической диагностики и новейших средств проведения испытаний со сверхпрецизионной точностью измерений 68

Секция перспективных технологий для систем безопасности 70

Д.С. Аниськин, А.Б. Андреев

Расчётные исследования аэродинамических характеристик прямоугольного крыла с несимметричным профилем с помощью программного комплекса ANSYS CFX 70

А.П. Ганцев

Алгоритм определения углов тангажа и креналетательного аппарата при маневрировании 70

Р.А. Крымов, Е.А. Цветков

Расчёт коррекции орбитального движения космического аппарата типа CubeSat после выведения в приближении модели SGP4 с учётом временных ограничений 71

Р.А. Бычков, Е.А. Цветков

Проведение баллистических расчётов с использованием модели SGP4 на графическом ускорителе 72

Е.А. Цветков, Р.А. Крымов

Пассивный способ определения параметров конфигурации «созвездия» космических аппаратов типа CubeSat на основе последовательности снимков 73

Н.Л. Аблаева, А.Б. Дубовский, А.С. Котельников, С.Ю. Поташов, М.С. Третьякова, В.Е. Турков

Оптимизация геометрии адгезионного соединения при воздействии температурных нагрузок 74

А.В. Софронов, А.Ю. Лизунов

Распределения атомов белка на поверхности глобулы для структур, определенных методами РСА, ЯМР и КЭМ 75

А.А. Баранов, С.А. Жукова, Д.Ю. Обижаев, В.Е. Турков

Изготовление микротрансформатора по МЭМС технологии 76

А.Н. Камшилов, Д.Ю. Обижаев, А.А. Баранов, С.Ю. Иванов, С.А. Жукова, И.В. Шашкин, В.Е. Турков

Повышение точности обработки сигналов малогабаритного цифрового электронного компаса 78

А.О. Шумилин, С.Ю. Иванов, О.В. Крылов, И.В. Шашкин, В.Е. Турков

Миниатюрный датчик угла Солнца на отечественной элементной базе 78

Секция теоретической механики 79

М.Ю.Шавин

Управляемая динамика беспилотного летательного аппарата (БПЛА) с поворотными роторами 79

Н.И. Амелькин, В.В. Холощак

Стационарные вращения спутника в центральном гравитационном поле при наличии внутренних упругих и диссипативных сил 80

С.В. Семендяев

Управление движением точки в канале с пульсирующей жидкостью 82

А.П. Иванов

О «балансирующих» камнях 83

В.И. Буякас

Механические самоустанавливающиеся замки для сборки и раскрытия составных твердотельных космических зеркал 84

С.В. Соколов,П.Е. Рябов
Бифуркационный анализ динамики двух вихрей в бозе-эйнштейновском конденсате 84
А.В. Ноздрин, Н.И. Амелькин
О вращательном движении спутника с демпфером на эллиптической орбите 86
А.Б. Батхин
О формальной устойчивости положения равновесия системы Гамильтона 87
Секция физики моря 90
И.М. Кутюхин
Кинематика раскола Мадагаскар – Сейшельского континентального блока 90
В.С. Кочергин, С.В. Кочергин
Восстановление данных поверхностной температуры при помощи вариационного алгоритма фильтрации 92
Ю.В. Фомин
Формирование грунтовых вод в области береговых примыканий Арктических регионов 93
М.Е. Куликов, И.П. Медведев, А.Т. Кондрин
Особенности непериодических колебаний уровня в морях российской Арктики 94
Н.Р. Хайруллин, Р. З. Мухаметьянов, Д. С. Ходаев, А.И. Висич, Н.Б. Степанова, Б.В. Чубаренко
Термохалинная структура вод в Балтийском проливе и её связь с режимообразующими факторами 96
А.И. Висич,Н.Б. Степанова, Р.З. Мухаметьянов, Н.Р. Хайруллин, Д.С. Ходаев, Б.В. Чубаренко, А.Н. Бабаков, А.Н. Граве
Двухслойная структура вод и некоторые особенности водообмена в Балтийском проливе 97
Д.С. Ходаев, А.И. Висич, Р.З. Мухаметьянов, Н.Р. Хайруллин, Н.Б. Степанова, Б.В. Чубаренко, А.Н. Бабаков, А.Н. Граве
Термохалинная структура вод в акватории Балтийского моря вблизи Балтийского пролива 98
Е.В. Колтовская, А.В. Леонов
Оценка биомассы фитопланктона с помощью CNPSi-модели на примере Белого моря 100
Секция аэрофизической механики и управления движением 102
А.А. Прутько
Решение задачи оптимального по расходу топлива маневра орбитальной пилотируемой станции псевдоспектральным методом Лобатто 102
С.В. Журин
Влияние профиля ветра в приземном слое на движение парашютной системы с упругим звеном 104
А.Р. Агишев
Учёт затенений КА при планировании коррекций поддержания ГСО электроракетными двигателями 106
А.А. Богер
Поиск оптимальной орбиты спутника для освещения заполярных городов 107

А.Е. Старченко

Оптимизация траектории выведении на геостационарную орбиту с целью снижения радиационной нагрузки на космический аппарат 109

Е.А. Воробьева, А.В .Богачев

Алгоритм переориентацией космического аппарата на высокоэллиптической орбите 110

К.А. Богданов

Задача поиска и поддержания равновесной ориентации МКС 112

В.С. Медведев

Разработка резервного контура управления ориентацией космического аппарата на базе программируемых логических интегральных схем 113

Секция систем, устройств и методов геокосмической физики 116

А.Г. Зотова, Г.А. Щербина

Оценка предельно допустимых отклонений оптических элементов зеркально-линзовых оптических схем 116

Д.М. Великосельская, В.С. Марков

Влияние различных факторов на измерения СПЭЯ космическими средствами 118

В.Е. Квитка

Детектор молний для МКС 120

Ю.М. Гектин, М.Б. Смелянский, Р.В. Андреев, А.А. Зайцев, С.Д. Коган

Модернизированный вариант бортовой радиометрической коррекции в ИК-аппаратуре ДЗЗ 121

Т.Л. Зильберлей, Н.С. Каурова, Б.М. Воронов, Ю.В. Лобанов, И.В. Третьяков, А.С. Шураков, А.А. Корнеев

Разработка технологии поверхностного монтажа планарных структур с диодами Шоттки в высокочастотную передающую линию 122

В.А. Головко, И.В. Сайто

Численный анализ информационных возможностей гиперспектрометрии аномальных климатических изменений с помощью космической группировки CLARREO 124

А. Николаева, С. Пулинец, Д. Узунов

Возможности использования российских аппаратов для мониторинга OLR с учетом опыта зарубежных исследований 126

В.А. Головко, А.А. Нестеров

Анализ экваториальной асимметрии распределения составляющих радиационного баланса Земли по данным длительных космических наблюдений 128

Г.М. Крученицкий, К.А. Статников

Анализ сезонной и долговременной изменчивости параметров ВРО над Южным полюсом 130

Ю.В. Дуфлот, С.Е. Фрид

Верификация спутниковых данных о поступлении солнечной радиации применительно к моделированию фотоэлектрических установок 133

Е.С. Зворыгина, Г.М. Крученицкий

Долговременная эволюция астрономических факторов, формирующих энергетический баланс климатической системы Земли 134

М.Г. Калацкий, Г.М. Крученицкий

Долговременная эволюция локальной температуры в начальной фазе эпохи «глобального потепления» 135

Р.А.Шокуев, Г.М.Крученицкий
Моделирование сезонной и долговременной изменчивости снежного покрова на территории СКФО и ЮФО РФ 136

Секция вычислительных моделей в механике и биомеханике 137

В.Т. Лукашенко, Ф.А. Максимов
Моделирование соударений осколков метеорного тела на сверхзвуковых скоростях 137

Д.А. Сидоренко, П.С. Уткин, Ф.А. Максимов
Математическое моделирование взаимодействия ударной волны с подвижным цилиндром 139

Д.А Андреев, Ф.А. Максимов
Аэродинамическое сопротивление звездообразного тела в сверхзвуковом потоке 141

В.Я. Киселевская-Бабинина, Т.Е. Санникова
Моделирование влияний гендерных различий на заболеваемость туберкулёзом 143

А.С. Гончарова, Ф.С. Орехов
Компьютерное исследование взаимодействия наночастиц с различными липидными мембранами 145

Я.Э. Порошина, П.С. Уткин
ЗНД-структура детонационной волны в рамках двухстадийной модели кинетики химических реакций 146

А.И. Лопато, П.С. Уткин
Математическое моделирование инициирования детонации при отражении ударной волны от профилированного торца канала 147

А.В. Розин
Робастность транспортных сетей Москвы и Санкт-Петербурга 149

Д.М. Идрисов
К исследованию толщины упрочненного слоя вблизи поверхности с высокими удельными силами трения 151

Ф.А. Максимов, Ю.Д. Шевелев
Математическое моделирование обтекания парашютной системы 153

А.И. Канзафарова
Оптимизация пакета PIPER под задачи белок-пептидного докинга 155

Д.С. Жемчужников
Оптимизация пакета PIPER. Быстрое моделирование белковых скоплений с использованием энергетического ландшафта простых молекулярных белок-белковых взаимодействий 156

Секция высоких технологий в обеспечении безопасности жизнедеятельности 158

А.А. Подкопаев, А.А. Хетагуров, В.Э. Буздин, И.Б. Линицкий
Принцип работы и создание прототипа фонаря и лазерного целеуказателя со светом, невидимым для камер наружного наблюдения 158

Л.Р. Борисова, Ю.В. Подрезов, А.Ю. Шевелев,
Методологический подход оценки профессионального поведения спасателей и граждан, приобретающих статус спасателя на право ведения газоспасательных работ 159

А.А. Хетагуров, В.Э. Буздин
Исследование физической сущности и особенностей возникновения и развития ураганов в Российской Федерации 161
В.Э. Буздин, А.А. Хетагуров, А.А. Подкопаев, И.Б. Линицкий, И.Ю. Яковлева
Анализ физической сущности и особенностей возникновения и развития вихревых процессов различных видов (ураганы, смерчи, шторма) в атмосфере Земли 161
Ю.В. Подрезов
Современные способы борьбы с наводнениями, вызываемыми осадками 162
Е.А. Железнякова, Л.Р. Борисова
Количественный анализ данных по биолого-социальным чрезвычайным ситуациям в Российской Федерации за 2000 – 2015 годы 164
Р.К. Анойкин
Эпиполярная геометрия в задачах обработки изображений 166
Е.И. Генералова, Л.Р. Борисова
Моделирование поведения толпы в условиях чрезвычайной ситуации 167
А.А. Подкопаев, А.А. Хетагуров, В.Э. Буздин, И.Б. Линицкий
Стратегические рекомендации и дополнения к проекту «Безопасная столица» 169
А.А. Гончаров
Квадрокоптеры на службе арктических подразделений МЧС 170
И.А. Малашкина, Л.Р. Борисова
Эконометрический анализ данных учений по эвакуации работающих на объекте экономики в условиях, приближенных к ЧС 171
А.К. Поляков
Оценка последствий и исследование возможностей, способов и средств борьбы со смерчами 172
П.К. Игнатьев
Оценка последствий и исследование возможностей способов и средств борьбы с ураганами в Российской Федерации 173
Б.Ш. Нурдинов
Исследование особенностей формирования и развития мультиячейковых градовых облаков 174
Д.А. Ребенок
Прогнозирование последствий крупных лесных пожаров 175
А.Р. Князев
Оценка последствий и исследование возможностей способов и средств борьбы с торнадо 175
С.А. Гареева
Методические особенности оценки лесопожарной обстановки на территории субъекта Российской Федерации 176
И.Б. Линицкий, А.А. Подкопаев, А.А. Хетагуров, В.Э. Буздин
Обеспечение безопасности населения на дорогах, объектах транспортной инфраструктуры и транспортных средствах 177
А.А. Гончаров
Взаимодействие Арктических подразделений МЧС с волонтерскими организациями 178
И.Ю. Яковлева, А.А. Подкопаев, А.А. Хетагуров, В.Э. Буздин, И.Б. Линицкий
Оценка устойчивости и сейсмостойкости зданий и сооружений 179

В.Д. Маркелова
Разработка автоматизированного комплекса измерения уровня воды для гидротехнических сооружений ... 180
А.Ю. Анненкова, А.Ю. Климчу, А.В. Родин
Реализация лидара на основе спектроскопии дисперсии в рамках задачи обнаружения утечек метана ... 182
А.З. Лемутова
Применение парадокса двигателя Стирлинга в Арктике для решения поставленных задач ... 183
А.Д. Лобанов
Поиск парадоксов Браесса в транспортных и физических задачах ... 184
О.И. Бондаренко, Д.А. Бондаренко, Д.Я. Антипин
Оценка безопасности пассажирских вагонов при аварийном опрокидывании на бок ... 186
Д.И. Абубакиров, Е.С. Крупник
Перспективные методы раннего обнаружения очагов лесных пожаров ... 189
Секция космической энергетики и двигателестроения ... 191
М.Д. Иванов, И.В. Лаптев
Модель механического разрушения коксового слоя потоком газа ... 191
К.А. Вишневский
Методика поэтапного численного моделирования распространения струи из сопла ... 192
Д.Ю. Прасолов
Расчетная модель поверхностного разрушения углеродных композиционных материалов ... 193
А.А. Шомин
Зондовые измерения концентрации электронов в электронно-лучевой плазме ... 195
Ю.Э. Мелкова
Расчет процессов горения в ракетных двигателях твёрдого топлива ... 195
А.Д. Кондратенко
Применение СПГ в качестве ракетного топлива ... 196
И.В. Лаптев, Д.В. Продан
Метод расщепления для моделирования газодинамических течений в произвольных трёхмерных областях ... 197
Секция нефтяного инжиниринга ... 200
А.Д. Кадырова, А.Н. Хлюпин
Моделирование процесса диффузии в нетрадиционных коллекторах ... 200
Е.А. Канин, В.А. Краснов
Метод расчета продуктивности скважин на неустановившемся режиме работы с учетом кривой характеристики лифта ... 201
А.Б. Карпов
Получение СПГ на газоперерабатывающих заводах ... 202
А.В. Блонский, Д.А. Митрушкин, Е.Б. Савенков
Моделирование двухфазных течений в дискретной системе трещин ... 204

А.С. Ерофеев, Б.В. Васекин
Метод ремасштабирования относительных фазовых проницаемостей на неструктурированных сетках 206
А.Н. Стерлев
Методы определения проницаемости проппантной пачки 207
А.А. Бычков
Алгоритмы расчета оптимальной системы разработки на скважинах со сложным заканчиванием 209
А.Е. Губанова, Е.В. Юдин
Моделирование поля давления при наличии дизъюнктивных нарушений геологической структуры 211
Секция прикладной механики 215
А.А. Быков, В.С. Молчанов, Н.В. Буртелова
Экспериментальное определение критической пористости стали 12Х21Н10Т, при которой теряется несущая способность 215
Ю.О. Алексеева, С.А. Бобков
Математическое моделирование выседания частиц аэрозоля из потока на поверхность нагретого сенсора 216
И.М. Перепечкин, А.А. Быков, Н.А. Завьялова, Г.В. Падерин
Моделирование процесса уплотнения пропанта в трещине ГРП и определение её эффективной проводимости 217
И.Н. Завьялов, Е.В. Пляшков, Р.А. Плавник
Лабораторное исследование колебаний давления при фильтрации с выделением газовой фазы 219
Л.О. Шихалиева, Т.В. Никитченко
Исследование влияния микроструктурных характеристик железорудных окатышей с различными модифицирующими добавками на их прочностные свойства 221
В.В. Родин, Н.А. Завьялова
Моделирование фильтрации в области с неоднородностями с использованием неструктурированных сеток 223
Секция управления в технических и социально-экономических системах 225
А.А. Ореховская
Оптимизация логистической деятельности как инструмент снижения выбросов парниковых газов 225
Аунг Мьят Хейн, А.Б. Варгин, Т.М. Васильева, М.Н. Васильев
Модификация акриловых полимеров в плазме ВЧ-разряда в комбинации с УФ-излучнием 226
Кхин Маунг Хтау, Зау Йе Мьинт, Хтет Вэй Ян Чжо, Т.М. Васильева
Пучково-плазменные технологии переработки природных полимеров 228
В.П. Михайлов, Л.А. Тун
Инженерная методика расчета и экспериментальные исследования платформы для активной виброзащиты 230
Е.С. Перебойкина
Факторы развития высокотехнологичных отраслей в регионах России 233

А.А. Романов, Д.А. Шпотя
Методический подход логистической поддержки проекта на основе языка SysML 235
П.А. Ярошенко
Сравнительный анализ экономической эффективности при транспортировке сжиженного природного газа и сжатого природного газа 237
Д.А. Егоров
Модель принятия решений на основе теории рационального невнимания 239
Н.Е. Константинова
Технические средства повышения безопасности логистических систем аэропортов 241
А.А. Шинов, Л.Л. Попов
К вопросу выбора математической модели распространения пульсовой волны 241
А.П. Расквас
Управление жизненным циклом сложных технических изделий. Роль единой модели данных в системах управления жизненным циклом 243
А.В. Бахчиев
Разработка концепции и прототипа платформы управления цифровыми сервисами 244
Е.С. Максимов
Подходы к определению соответствия текста его заголовку. 246
A. Pardo, E. Garcia and T. Vasilieva
Surface Modification of Chitosan by Cold-Plasma 246
А.Р. Салихова
Геоинформационные системы поддержки логистической деятельности в газовой и нефтяной областях 248
Я.А. Реутт, Е.А. Старостин
Учёт влияния каннибализации при прогнозировании спроса на товар 249
Д.С. Марков
Экономическая оценка спасательных операций 250
А.В. Болдырева
Прогнозирование кризисных явлений в экономике на основе сигналов в Интернете в технике МГУА 251
J. Ramirez
Optimization of control and operation in hybrid beam plasma systems 254
А.А. Кононова
Иерархическое тематическое моделирование корпуса документов на основе группировки его предметного словаря по вертикали и горизонтали 256
В.Е. Вахоцкая
Система online бронирования доков 259
Е.С. Петровская, Е.В. Худько
Предложения по улучшению условий для развития проектного финансирования в РФ на основании анализа мировых практик 259
Р.Н. Курбанов
Важность корректности данных в информационных системах и методы их сбора на практике 261

А.А. Пшеничникова

Безопасность производства и логистики сжиженного природного газа в арктических условиях 263

Секция компьютерного моделирования 265

Д.В. Апраксин

Оптимизация системы распределенных вычислений с целью снижения времени расчетов аэродинамических характеристик летательных аппаратов 265

Выонг Ван Тьен, С.Л. Горелов

Нелинейные явления в разреженном газе в задаче Куэтта 265

С.Л. Горелов, К.А. Чопова

Метод Монте-Карло в задаче о распространении периодических возмущений в разреженном газе 267

А.В. Волков, Т.Д. Зыонг

Решение задач обледенения профиля в приближении «тонкого льда» методом Галеркина с разрывными базисными функциями 268

А.А. Черненко, А.В. Лысенков

Учет деформаций изгиба и кручения при расчете аэродинамических характеристик воздушного винта 271

А.А. Жиркина, Я. Пико

Байесовская локализация дрейфующего объекта при наличии стохастического воздействия внешней силы 271

С. Бахнэ

Сравнительный анализ сходимости численных методов при расчёте температуры на поверхности летательного аппарата 273

И.В. Воронич, В.Х. Нгуен

Расчетное исследование характеристик модели одноступенчатого осевого компрессора JT8D в мотогондоле 275

В.А. Вершков, Б.С. Крицкий, Р.М. Миргазов

Подход к моделированию обтекания несущего винта вертолета с учетом махового движения лопастей 278

И.В. Егоров, Н.К. Нгуен

Исследование влияния функции ограничителя, схем TVD и WENO на решение уравнений Навье–Стокса 279

М.В. Недорезов

Разработка методики определения параметров траекторного движения наблюдаемого объекта с использованием методов технического зрения 281

А.В. Минко

Исследование течений в переходных каналах различной конфигурации для обеспечения эффективного рабочего процесса в камере сгорания модельного прямоточного ВРД 282

В.В. Вышинский, А.О. Кисловский, В.В. Ткаченко

Методы обучения искусственных нейронных сетей 283

П.В. Чувахов

Влияние вихрей Гёртлера различной интенсивности на теплообмен при гиперзвуковом обтекании угла сжатия 286

Е.С. Матяш, А.А. Савельев, А.И. Трошин

Оптимизация внешней поверхности мотогондолы ТРДД с учетом ламинарно-турбулентного перехода 288

Л.Н. Кудрявцева, В.О. Цветкова, В.А. Гаранжа
Вариационный метод построения триангуляции Делоне для неявно заданной области с внутренними границами 290

Секция прочности летательных аппаратов 292

А.А. Фомичев
Совершенствование методик проведения частотных испытаний при использовании электродинамических вибровозбудителей 292

Хеин Зин Мое, В.А. Киреев, Йе Тинт Хут
Развитие методов определения характеристик упругости композитов на изгиб 293

Йе Тинт Хту, Хеин Зин Мое, В.А Киреев
Определение характеристик упругости оболочных конструкции из композитов при испытаниях на изгиб 294

Фон Мьинт Тун, В.Н. Семенов
Исследование прочностных характеристик элемента замкнутого крыла с нелинейной осью..... 296

А. Пхио, В.В. Чедрик
Применение методов критериев оптимальности и последовательного квадратичного программирования для решения задачи минимизации веса конструкции..... 298

И.В Волков, Ньян Мин Хтет, Вей ХлэйнУ, Тун Мин Лат
Определение физико-механических характеристик материалов при исследовании концентрации напряжений в образце с отверстием..... 299

Е.И. Якимова, А.И. Драцкая
Лёгкая арматурная сетка с квадратными ячейками..... 301

К.А. Колесник
Прогнозирование термовлажностной деградации ПКМ..... 303

А.И. Драцкая, А.А. Скворцова
Плёночная модель нового композиционного материала 303

Секция теоретической и прикладной аэрогидромеханики 306

Т.А. Пименова
Исследование характерных особенностей вторичного отрыва при дозвуковом обтекании обратной ступеньки..... 306

У.Г. Ибрагимов
Автомодельные течения вязкого газа, истекающего из вершины конуса..... 308

М.А. Демьянов, М.Ю. Зайцев, Г.А. Фараносов
Разработка и реализация методов beamforming применительно к диагностике некоррелированных диполей..... 310

А.А. Скворцова, В.С. Жукова
Механика и гидродинамика привода лодки–амфибии..... 312

В.Ф. Копьев, С.А. Чернышев, М.А. Юдин
Исследование Майлсовской неустойчивости в задаче о циркуляционном обтекании цилиндра в ограниченной области. 314

Д.А. Гаджиев, А.М. Гайфуллин, А.В. Зубцов
Двумерное вихревое течение сжимаемого газа, порождаемое вращением бесконечного кругового цилиндра..... 316

В.Ф. Копьев, С.А. Чернышев, Р.В. Акиньшин, М.А. Юдин
Получение полного набора периодических решений в ядре тонкого изохронного вихревого кольца 317
А.А. Балашов, Г.Н. Дудин
Исследование обтекания пластины на режиме сильного взаимодействия при наличии массообмена 319
В.Ф. Копьев, Г.А. Фараносов, И.В. Беляев, О.П. Бычков
Экспериментальное исследование шума взаимодействия струи и крыла при помощи метода азимутальной декомпозиции 321
В.И. Воронцов, М.Ю. Зайцев, С.А. Карабасов
Численное моделирование аэродинамических и акустических характеристик вертолетного винта на режиме горизонтального полета вперед 322
И.В. Петров, Ф.М. Чупраков
Динамика струи жидкости, истекающей из неидеального сопла 323
Секция физики полёта 327
Ф.Э. Орфинежад, Т.М. Притуло, Л.Л. Теперин
Применение полезной интерференции в задачах взаимодействия закрученной струи от пропеллера с несущей поверхностью 327
Йе Хтун, А.А Хохлов
Некоторые вопросы оценки безопасности полета летательного аппарата в условиях возмущенной атмосферы 328
М.Е. Архипов, А.А. Павленко, М.А. Севостьянов
Численное исследование интерференции переднего горизонтального оперения с крылом 329
Н.Д. Агеев, А.А. Павленко
Применение adjoint solver в задачах внешней аэродинамики 330
Мье Тхеин
Способы снижения индуктивных потерь на балансировку компоновки крыло-оперение 331
Б.С. Крицкий, Р.М. Миргазов, Лэ Ван Чунг
Влияние индивидуального управления лопастями несущего винта вертолета на виброперегрузки 331
М.Е. Архипов, А.А. Павленко, К.Д. Стремоусов
Численное исследование влияния «зуба» на эффективность горизонтального оперения 333
М.А. Меняйлов
Выбор параметров для формирования облика сверхзвукового пространственного воздухозаборника на основе диффузора Буземана 334
Секция физических проблем аэрогидромеханики и авиационной экологии .338
С.Ю. Маламанов
О намагничивающем действии кругового движения проводящей жидкости 338
А.В. Кашеваров, А.Л. Стасенко
Моделирование обледенения профиля в потоке, несущем сфероидальные кристаллы 340
Ю.В. Маношкин, А.А. Плотников
Особенности перехода резистивного барьерного разряда в сильнотоковый режим 341

Ю.В. Маношкин, А.А. Плотников
Электрический ветер в системах несимметричных электродов 343
М.Е. Бондарев, О.М. Карякин, А.Г. Наливайко, М.В. Устинов, Я.Ш. Флаксман
Исследования воздействия струйных актуаторов на картину обтекания прямоугольного крыла 345
И.А. Амелюшкин, А.Л Стасенко.
Динамика несферических частиц в газовых потоках 347
В.М. Кузнецов, К.Б. Терешкина
Расчет колебательных спектров двухвалентных катионов в биокристаллических наноструктурах 349
Э.С. Гринац, В.А. Жбанов, А.Б. Миллер, А.Л. Стасенко
Экспериментальное и теоретическое исследования динамики капель воды по поверхности модели под действием воздушного потока в приложении к проблеме обледенения 349
Г.В. Моллесон, А.Л. Стасенко
Воздействие на тело осесимметричных и плоских дозвуковых потоков с учётом упруго-пластического и хрупкого разрушений материалов 350
В.А. Жбанов, А.В. Кашеваров, А.Б. Миллер, Ю.Ф. Потапов, А.Л. Стасенко
Исследования аккреции льда на нагреваемой поверхности крыла при обтекании воздушно-кристаллическим потоком 351
М.М. Кузнецов, Ю.Д. Кулешова, Ю.Г. Решетникова, Л.В. Смотрова
Эффект высокоскоростного «перехлеста» в ударной волне в рамках априорной аппроксимации функции распределения молекул 352
М.М. Кузнецов, С.В. Матвеев, Е.В. Молоствин, А.А. Перо
Аналитические свойства нелинейной реологии и релаксации макропараметров в ударной волне 353
М.А. Яковец, Н.Н. Остриков, М.С. Ипатов
Особенности настройки системы динамиков для генерации звукового поля с заданной азимутальной структурой в цилиндрическом канале 354
И.А. Мартынов, Д.А. Леманский
Моделирование термоискажений, возникающих в зеркалах под воздействием теплового потока 354
Ю.Е. Маркачев
Теоретическая оценка параметров уравнения состояния Ван-дер-Ваальса, коэффициентов вязкости и теплопроводности аргона 356
А.Д. Михалева
Экранирование конвективного теплообмена 357
Н.В. Самойлова
Логарифмический участок профиля скорости в турбулентном пограничном слое ... 359
Секция техники и методики аэрофизического и летного эксперимента.....361
С.И. Иншаков, Е.Д. Кудрявцева
Перспективы методов выделения оптических неоднородностей в сечениях зондирующего светового пучка 361
Г.Г. Гаджимагомедов, Г.Я. Масленников, Д.С. Сбоев
Применение метода главных компонент для исследования когерентных структур в турбулентном течении газа 361
С.А. Баранов, Д.С. Сбоев
Система сбора данных для АДТ малых скоростей Т-03 ЦАГИ 363

Т.Т. Нгуен, Д.С. Сбоев, В.В. Ткаченко
Подготовка АДТ малых скоростей АТ-3 ФАЛТ МФТИ к экспериментам по ламинарно-турбулентному переходу 364
М.В. Бусарова, В.П. Кулеш
Привязка системы координат при измерениях деформации модели методом видеограмметрии 366
Д.В. Ливерко, А.В. Ливерко, Д.С. Сбоев
Исследование пульсаций в канале воздухозаборника при помощи термоанемометра 367

Программный комитет конференции

Н.Н. Кудрявцев, ректор МФТИ – председатель

В.А. Баган, директор по развитию – заместитель председателя

А.А. Воронов, проректор по учебной работе и довузовской подготовке

А.В. Дворкович, директор ФРКТ

В.В. Киселев, директор ФФПФ

С.С. Негодяев, директор ФАКТ

В.В. Иванов, директор ФЭФМ

А.М. Райгородский, директор ФПМИ

С.В. Леонов, директор ФБМФ

П.К. Кашкаров, директор ИНБИКСТ

Организационный комитет конференции

М.В. Милов, руководитель направления «Образование» ЦУП – председатель

С.О. Русскин, представитель ФРКТ

Е.Ю. Чиркина, представитель ФФПФ

Ю.О. Алексеева, представитель ФАКТ

В.Б. Макарова, представитель ФАКТ

В.А. Яворский, представитель ФЭФМ

С.А. Зайцев, представитель ФЭФМ

Е.Г. Молчанов, представитель ФПМИ

В.Н. Логинов, представитель ФПМИ

К.А. Коньков, представитель ФПМИ

К.И. Агладзе, представитель ФБМФ

В.Г. Орлов, представитель ИНБИКСТ

М.В. Костелева, представитель УНЦ ГСН

А.С. Гупаисова, начальник пресс-службы

Е.Д. Жебрак, директор аналитического центра

Рецензенты научных докладов

Г.В. Костин, д.ф.-м.н.

А.В. Глушнева, к.ф.-м.н.

Н.Г. Паничкин, к.ф.-м.н., доцент

Е.А. Цветков, к.ф.-м.н.

Н.И. Амелькин,д.ф.-м.н., профессор

Н.Б. Степанова, к.ф.-м.н.

С.Н. Тимаков, д.т.н.

А.С. Кузьмичев, к.т.н.

А.А. Жмуров, к.ф.-м.н., PhD

Ю.В. Подрезов, д.с.-х.н., к.т.н., доцент

А.С. Рощин, к.ф.-м.н.

А.А. Быков, к.т.н.

Д.А. Притыкин, к.ф.-м.н., доцент

А.А. Спивак, д.ф.-м.н., профессор

А.В. Булычев, к.ф.-м.н.

Секция управления динамическими системами

УДК539.3

Моделирование контактного взаимодействия захватывающего инструмента с биологической тканью

А.А. Яковенко

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Разработана модель для исследования распределения усилий между выступами зажима, используемого для захвата мягких биологических тканей, а также связь приложенных сил с внедрением инструмента при разных расположениях выступов. Исследовано распределение нагрузок на выступы и зависимость неравномерности распределения этих нагрузок от расстояния между выступами. Также показана возможность возникновения ситуации, когда нагрузка на некоторые выступы будет принимать нулевые значения.

Рассмотрена контактная задача о внедрении жесткого штампа, имеющего на поверхности систему N выступов, в упругое полупространство с заданными характеристиками (E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона). Выступы моделировались вытянутыми вдоль оси Ox штампами, где $2a_i$ – длина $i^{го}$ выступа, $2\delta_i$ – его ширина. Все выступы зажимного инструмента имели одинаковую высоту и прямоугольную в плане форму. Расстояние между выступами и размеры площадок контакта считались заданными (l_{ij} – расстояние между $i^{ым}$ и $j^{ым}$ выступами). Инструмент вдавливался без перекоса в упругое основание заданной силой P.

Условие контакта для $i^{го}$ выступа представляет собой равенство внедрения и смещения границы упругого полупространства [1], которое на основании принципа суперпозиции можно представить как сумму вертикальных смещений $u_z^{i(1)}(x,y)$ и $u_z^{i(2)}(x,y)$, где $u_z^{i(2)}(x,y)$ – смещение, обусловленное распределенным по рассматриваемому пятну контакта давлением $p_i(x,y)$, а $u_z^{i(1)}(x,y)$ - смещение, обусловленное влиянием остальных выступов. Получаем

$$D - f(x,y) = u_z^{i(1)}(x,y) + u_z^{i(2)}(x,y). \qquad (1)$$

Здесь D – внедрение инструмента в основание, которое не зависит от координат вследствие одинаковой высоты выступов, а $f(x,y)$ – форма контактирующей поверхности штампа. Смещение границы выступа, вызванное давлением $p_j(x,y)$, распределенным по другим, вычисляется по формуле $u_z^{i(1)}(x,y) = \dfrac{1-\nu^2}{\pi E}\sum\limits_{j=1,\,j\neq i}^{N}\iint \dfrac{p_j(x',y')dx'dy'}{\sqrt{\left(X_j + x' - x\right)^2 + \left(Y_j + y' - y\right)^2}}$, где $\left(X_j, Y_j\right)$ – координаты центральной точки области контакта $j^{го}$ выступа ($X_j = 0, Y_j = l_{ij}$).

Для определения зависимости упругих смещений от приложенных давлений для единичного выступа использовалось решением Галина [2] для узкого прямоугольного в плане штампа длиной a и шириной δ, согласно которому смещение в среднем сечении $i^{го}$ выступа, вызванное приложенным к нему давлением, вычисляется по формуле

$$u_z^{i(2)}(x) = \frac{2\left(1-\nu^2\right)\lg\left(a_i/\delta_j\right)}{\pi E}\int\limits_{-\delta_i}^{\delta_i} p_i(x,y)dy = \frac{2\left(1-\nu^2\right)\lg\left(a_i/\delta_j\right)}{\pi E}p_i(x), \qquad (2)$$

Условие равновесия в данном случае будет иметь вид $P=\sum_{i=1}^{N}P_i$, где

$P_i=\iint p_i(x,y)dxdy$ – нагрузка, действующая на $i^{ый}$ выступ (интеграл берется по области контакта $i^{го}$ выступа).

В силу предположения об узости выступа ($\delta_j \ll a_j$), распределение давления $p_j(x,y)$ можно заменить распределением погонной силы $p_j(x)$ на отрезке $(-a_j,a_j)$. А также рассматривались штампы, имеющие плоское основание ($f(x,y)=0$). Тогда условие контакта (1) будет иметь вид $D=\frac{2\left(1-\nu^2\right)\lg\left(a_i/\delta_i\right)}{\pi E}p_i(x)+\frac{1-\nu^2}{\pi E}\sum_{j=1,j\neq i}^{N}\int_{-a_i}^{a_i}\frac{p_j(x')dx'}{\sqrt{\left(x'-x\right)^2+l_{ij}{}^2}}$.

Отсюда получаем

$$D=\frac{2\left(1-\nu^2\right)\lg\left(a_i/\delta_i\right)}{a_i\pi E}P_i+\frac{1-\nu^2}{a_i\pi E}\sum_{j=1,j\neq i}^{N}\int_{-a_i}^{a_i}\int_{-a_i}^{a_i}\frac{p_j(x')dx'dx}{\sqrt{\left(x'-x\right)^2+l_{ij}{}^2}}. \qquad (3)$$

Данная система вместе с условием равновесия позволяет найти внедрение и распределение нагрузок, если известно взаимное расположение выступов, вид функции распределения давления под каждым штампом и величина силы, приложенной к инструменту.

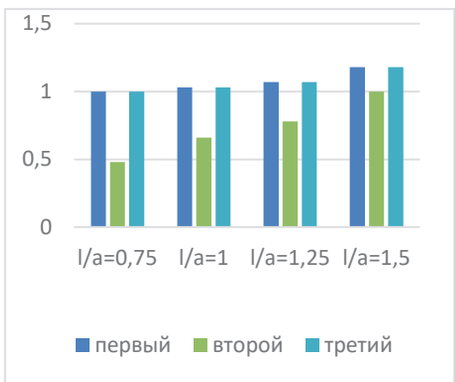
Считалось, что все выступы имеют одинаковую форму и длину ($2a$). И в силу симметрии функции $p_j(x)$, а также симметрии области интегрирования, погонные силы в интеграле были заменены на сосредоточенные, действующие в центре выступа. Таким образом,

$$D=\frac{\left(1-\nu^2\right)\lg\left(a/\delta_i\right)P_i}{a\pi E}+\frac{1-\nu^2}{2a\pi E}\sum_{j=1,j\neq i}^{N}P_j\ln\frac{\sqrt{a^2+l_{ij}^2}+a}{\sqrt{a^2+l_{ij}^2}-a}. \qquad (4)$$

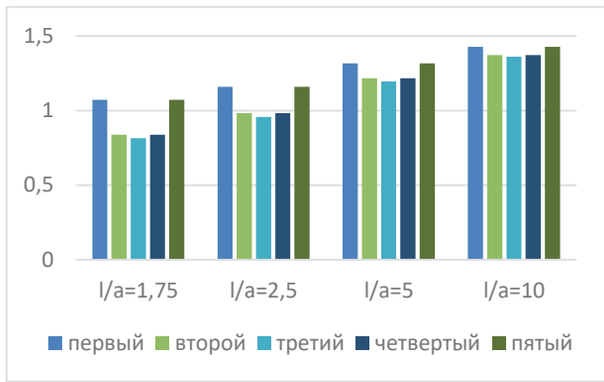
Представлены распределения (1а – три выступа, 1б – пять выступов) нагрузок между выступами $P_i\left(1-\nu^2\right)\Big/DaE$, рассчитанные для различных расстояний между ними и при следующих значениях безразмерных параметров:

$$\lg\left(a/\delta\right)=\lg 100=2,\ l/a=0.75,\ 1,\ 1.25,\ 1.5.$$

Полученные результаты позволяют определить максимальные контактные напряжения, возникающие в биологической ткани при разной степени ее сжатия и при разных формах рельефа поверхности зажима. Используемая в работе форма выступа в форме узкого штампа с плоским основанием является упрощенной и не всегда подходящей для применения, так как острые углы приводят к возникновению высоких локальных напряжений на краях выступов. Однако она позволяет на основании полученных аналитических зависимостей дать предложения относительно расположения выступов и их геометрических размеров с целью обеспечения их равнонагруженности и уменьшения общей прикладываемой силы для обеспечения нужной величины внедрения (захвата ткани).



а)



б)

Рис.1 Диаграмма распределения нагрузок между выступами

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 16-58-52033).

Литература

1. *Горячева И. Г.* Механика фрикционного взаимодействия. М.: Наука, 2001. 478 с.
2. *Галин Л. А.* Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости. М.: Наука, 1980. 304 с.

УДК 681.5

Управление беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) с поворотными роторами

М.Ю. Шавин

Московский физико-технический институт (государственный университет)

В работе рассматривается беспилотный летательный аппарат (БПЛА) с четырьмя поворотными роторами. Отличие от классической конструкции квадрокоптера состоит в том, что помимо управления оборотами винтов, создающих тягу, аппарат снабжён дополнительными сервоприводами, способными изменять направления осей ротора относительно корпуса. Показано, что в отличие от классических квадрокоптеров аппарат с поворотными винтами полностью управляем по всем шести степеням свободы за счёт большей размерности вектора управляющих параметров [1]. Общий вид аппарата представлен на рис. 1.

Построена модель управляемой динамики аппарата с поворотными роторами, учитывающая основные силы и моменты, действующие на элементы системы. Ориентация элементов системы дана в кватернионном описании [2]. Модель реализована в среде Matlab Simulink.

Синтезирован контур управления моделью квадрокоптера с поворотными роторами. Реализованный алгоритм управления позволяет одновременно управлять положением и ориентацией аппарата, а также учитывать ограничения, связанные с конструктивными особенностями.

Независимое управление положением центра масс и ориентацией аппарата потенциально позволяет ориентировать жестко закреплённую на корпусе аппарата камеру, или дальномер. На основе произведённого моделирования планируется разработка и создание опытного образца БПЛА.

Рис. 1. Общий вид БПЛА с поворотными роторами

Литература

1. *Ryll M., Bülthoff H.H., Giordano P.R.* Modeling and control of a quadrotor UAV with tilting propellers // Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference. 2012. P. 4606–4613.
2. *Амелькин Н.И.* Кинематика и динамика твердого тела. М.: МФТИ, 2000.

УДК 534-18

Расчет собственных частот колебаний многослойной упруго-жидкой среды с помощью её усредненной модели

А.С. Шамаев, В.В. Шумилова

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

Рассмотрена область $\Omega=(0,L)^3$, целиком заполненная чередующимися слоями изотропного упругого материала и вязкой сжимаемой жидкости. Число всех упругих и жидких слоев полагается равным $2M$, толщина любых двух соседних слоев – равной ε $(0<\varepsilon\ll L)$, а толщина каждого упругого (жидкого) слоя – равной ε_1 (ε_2). Дополнительно предполагается, что все слои параллельны плоскости Oyz.

Пусть $L_{1\varepsilon}$ ($L_{2\varepsilon}$) – объединение всех “упругих” (“жидких”) частей интервала $(0,L)$, а Γ_ε – объединение всех точек, разделяющих $L_{1\varepsilon}$ и $L_{2\varepsilon}$. Математическая модель, описывающая одномерные колебания вдоль оси Ox слоистой среды, имеет вид

$$\rho_r\frac{\partial^2 u^\varepsilon}{\partial t^2}=\frac{\partial \sigma^\varepsilon}{\partial x}+f(x,t),\quad x\in L_{r\varepsilon},\quad r=1,2, \tag{1}$$

$$[u^\varepsilon]_\varepsilon=[\sigma^\varepsilon]_\varepsilon=0;\quad u^\varepsilon(0,t)=u^\varepsilon(L,t)=0,\quad t>0, \tag{2}$$

$$u^\varepsilon(x,0)=\frac{\partial u^\varepsilon}{\partial t}(x,0)=0,\quad x\in(0,L), \tag{3}$$

где ρ_r – плотность среды в $L_{r\varepsilon}$, $u^\varepsilon(x,t)$ – перемещение, $f(x,t)$ – заданная сила, скобки $[g]_\varepsilon$ обозначают скачок функции g при переходе через границы Γ_ε, $\sigma^\varepsilon(x,t)$ – напряжение,

$$\sigma^{\varepsilon} = (\lambda + 2\mu)\frac{\partial u^{\varepsilon}}{\partial x},\ x \in L_{1\varepsilon}; \quad \sigma^{\varepsilon} = \gamma\frac{\partial u^{\varepsilon}}{\partial x} + (\zeta + 2\eta)\frac{\partial^2 u^{\varepsilon}}{\partial x \partial t},\ x \in L_{2\varepsilon}.$$

Здесь λ и μ – параметры Ламе упругого материала, γ – объемный модуль упругости жидкости, $\gamma = \rho_2 c^2$, c – скорость звука в жидкости в состоянии покоя, ζ и η – коэффициенты вязкости [1].

Математическая модель, описывающая одномерные колебания вдоль оси Ox усредненной среды, соответствующей рассмотренной упруго-жидкой среде, имеет вид (см. [2, 3])

$$\rho\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \alpha\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - qe^{-\xi t} * \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + f(x,t), \quad x \in (0,L),$$

$$u(0,t) = u(L,t) = 0, \quad t > 0; \quad u(x,0) = \frac{\partial u}{\partial t}(x,0) = 0, \ x \in (0,L),$$

где символ $*$ обозначает операцию свертки по переменной t, $\rho = \rho_1(1-h) + \rho_2 h$,

$$\alpha = \frac{\lambda + 2\mu}{1-h}, \quad q = \frac{h(\lambda+2\mu)^2}{(1-h)(\zeta+2\eta)}, \quad \xi = \frac{(\lambda+2\mu)h + \gamma(1-h)}{(1-h)(\zeta+2\eta)}, \quad h = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon}.$$

Под спектром одномерных собственных колебаний слоистой упруго-жидкой среды понимается множество S_ε всех комплексных значений s, при которых задача (1)–(3), записанная в изображениях Лапласа, имеет нетривиальные решения $u^{\varepsilon}(x,s)$. Выписывая изображения Лапласа решений однородных дифференциальных уравнений, соответствующих уравнениям (1), на каждой упругой и жидкой частях интервала $(0,L)$ и используя условие периодичности по x, можно показать, что множество S_ε состоит из ненулевых корней следующих M уравнений:

$$(1+K_s)\left(-1+\exp(2K_{1s}^{\varepsilon}+2K_{2s}^{\varepsilon})\right)+(1-K_s)\left(\exp(2K_{1s}^{\varepsilon})-\exp(2K_{2s}^{\varepsilon})\right)=0, \tag{4}$$

$$\left(2+K_s+K_s^{-1}\right)\left(\exp(-K_{1s}^{\varepsilon}-K_{2s}^{\varepsilon})+\exp(K_{1s}^{\varepsilon}+K_{2s}^{\varepsilon})\right)+$$

$$+\left(2-K_s-K_s^{-1}\right)\left(\exp(K_{1s}^{\varepsilon}-K_{2s}^{\varepsilon})+\exp(K_{2s}^{\varepsilon}-K_{1s}^{\varepsilon})\right)=8\cos\frac{\pi k}{M}, \quad k=1,...,M-1, \tag{5}$$

где введены следующие обозначения:

$$K_s = \sqrt{\frac{\rho_1(\lambda+2\mu)}{\rho_2(\gamma+s\zeta+2s\eta)}}, \quad K_{1s}^{\varepsilon} = \varepsilon_1 s\sqrt{\frac{\rho_1}{\lambda+2\mu}}, \quad K_{2s}^{\varepsilon} = \varepsilon_2 s\sqrt{\frac{\rho_2}{\gamma+s\zeta+2s\eta}}.$$

Положительные мнимые части невещественных корней уравнений (4) и (5) представляют собой собственные частоты колебаний слоистой упруго-жидкой среды. Ввиду того, что корни этих уравнений не выписываются в явном виде, собственные частоты колебаний находятся численно с помощью, например, метода аргумента, хорошо известного в теории функций комплексного переменного. Для этого, прежде всего, требуется выбрать достаточно хорошие начальные приближения к невещественным корням уравнений (4) и (5). Так как динамические свойства исходной и усредненной сред близки друг к другу при достаточно малых ε, то в качестве таких приближений целесообразно брать невещественные корни кубических уравнений

$$s^3 + \xi s^2 + \frac{\alpha\pi^2 k^2}{\rho L^2}s + (\alpha\xi - q)\frac{\pi^2 k^2}{\rho L^2} = 0, \quad k \in \mathbf{N}$$

которые представляют собой невещественную часть спектра одномерных собственных колебаний усредненной среды. На примере слоистой среды с заданными числовыми характеристиками упругих и жидких слоев показано, что точность указ анных

приближений быстро растет при увеличении числа слоев, входящих в область Ω. Иными словами, относительная погрешность собственных частот колебаний усредненной среды, рассматриваемых в качестве приближенных значений собственных частот колебаний слоистой упруго-жидкой среды, быстро уменьшается при уменьшении величины периода ε.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-11-10343).

Литература

1. *Санчес-Паленсия Э.* Неоднородные среды и теория колебаний. М.: Мир, 1984. 472 с.
2. *Gilbert R.P., Mikelić A.* Homogenizing the acoustic properties of the seabed: Part I // Nonlinear Analysis. 2000. Т. 40. № 1. P. 185–212.
3. *Шамаев А.С., Шумилова В.В.* О спектре одномерных колебаний в среде из слоев упругого материала и вязкоупругого материала Кельвина–Фойгта // ЖМВМФ. 2013. Т. 53, № 2. С. 282–290.

УДК 517.977.56 + 536.24

Управление процессами теплообмена в цилиндрическом теле

***А.А. Гавриков*[1], *Г.В. Костин*[1,2]**

[1]Институт проблем механики им. А.Ю. Ашлинского РАН
[2]Московский физико-технический институт (государственный университет)

Рассмотрена задача управления процессами теплообмена в цилиндрическом теле, окруженном воздухом. На торцах цилиндра приложено граничное управление тепловыми потоками, реализуемое, например, с помощью элементов Пельтье. Исследуемая система, соответствующая экспериментальной установке, реализованной сотрудниками кафедры мехатроники университета г. Росток, Германия, описывается краевой задачей

$$\begin{gathered}
\rho c_p \theta_t = \lambda\left(\vartheta_{zz} + \frac{1}{r}\left(r\theta_r\right)_r + \frac{1}{r^2}\theta_{\phi\phi} \right), \quad (t,\phi,r,z) \in \Omega, \\
\theta\big|_{t=0} = \theta^0, \quad \lambda\,\theta_z\big|_{z=0} = u_-(t), \quad \lambda\,\theta_z\big|_{z=z_1} = u_+(t), \\
\theta(t,\phi,r,z) = \theta(t,\phi+2\pi,r,z), \qquad (1) \\
\left[\lambda\theta_r + \alpha\left(\theta-\theta_a\right)\right]_{r=r_1} = 0, \\
\Omega = \left(0,T\right)\times V, \quad V = \left(0,2\pi\right)\times\left(0,r_1\right)\times\left(0,z_1\right).
\end{gathered}$$

Здесь θ – температура, r_1, z_1 – радиус и высота цилиндра, λ – коэффициент теплопроводности, ρ – плотность, c_p – теплоемкость материала, θ_a – температура окружающего тела воздуха, $\vartheta^0 = \vartheta^0(\varphi,r,z)$ – начальное распределение температуры, α – коэффициент теплопередачи, $u_\pm$ – управляющий тепловой поток на торцах, T – некоторый заданный момент времени. Целью управления полагается приведение температуры в теле к заданному распределению (в простейшем случае – к температуре окружающей среды θ_a) за время T при условии минимизации используемого ресурса управления.

Приведенная краевая задача изучается, и управление теплообменом строится с помощью двух подходов: метода Фурье [1] и метода интегро-дифференциальных соотношений (MIDR) [2].

С помощью метода Фурье система (1) сводится к задаче управления собственными формами (модальный подход). В качестве минимизируемого целевого функционала рассматривается сумма отклонения в пространстве квадратично-интегрируемых функций

$L_2(V)$ результирующей температуры $\theta(T)$ от постоянной θ_a и квадратичного функционала от вектора управления $u = (u_-, u_+)^*$

$$\int (\theta(T) - \theta_a)^2 dV + \int_0^T u^* R u dt, \tag{2}$$

где R – положительно определенная матрица. Использование модального подхода позволяет привести задачу к задаче построения линейно-квадратичного регулятора.

Для двух низших мод, соответствующих остыванию тела как целого и антисимметричным по оси z процессам с распределением температуры, пропорциональным $\cos(\pi z / z_1)$, управление строится в явном виде. Эти моды имеют наибольшие характерные времена затухания при принятых физических параметрах [3]. Аналитически исследовано влияние построенного управления на высшие моды. Показано, что возбуждение высших мод асимптотически (по номеру моды) мало. Отметим также, что при используемом в (1) граничном управлении неоднородные по углу φ моды оказываются неуправляемыми.

При использовании MIDR исходная задача (1) сводится также к задаче построения линейно-квадратичного регулятора: рассматривается управление процессами, соответствующими первым по радиальной координате r и по угловой φ модам; решение ищется в пространстве полиномиальных функций по продольной координате z. Далее, в соответствии с методом, ослабленный (понимаемый в интегральном смысле) закон теплопроводности Фурье проецируется также на пространство полиномиальных функций. В итоге исходная задача приводится к задаче управления двумя системами ОДУ (для четных и нечетных полиномов) с условиями минимизации линейно-квадратичного функционала.

Рассмотрено 3 типа функционалов: 1) аналогичный используемому в методе Фурье функционалу (2), 2) учитывающий дополнительно норму в L_2 градиента температуры, 3) учитывающий дополнительно вместо нормы градиента норму ошибки аппроксимации. Последняя определяется как интегральная погрешность выполнения закона теплопроводности Фурье.

Численно показано, что использование функционала типа 3 позволяет на порядки уменьшить ошибку аппроксимации по сравнению с использованием функционала типа 1 для определенного класса начальных условий. Использование функционала типа 2 показало себя менее эффективным, поскольку оказалось, что подобрать весовые коэффициенты в функционале так, чтобы одновременно уменьшилась и норма отклонения температуры от заданной и норма градиента (по сравнению с использованием функционала типа 1), достаточно сложно. Расчеты проводились при аппроксимации решения полиномами 9-й степени. Показано также, что ошибка аппроксимации уменьшается при увеличении порядка аппроксимации.

На рис. 1 приведен один из результатов расчета – решения задачи построения оптимального управления для вышеупомянутых двух систем ОДУ для некоторых начальных условий. Показаны норма в L_2 отклонения температуры от заданной (слева) для неуправляемого процесса (сплошная линия), при использовании функционала типа 1 (пунктир) типа 2 (точечная линия) и типа 3 (штрихпунктир), и норма градиента температуры (справа).

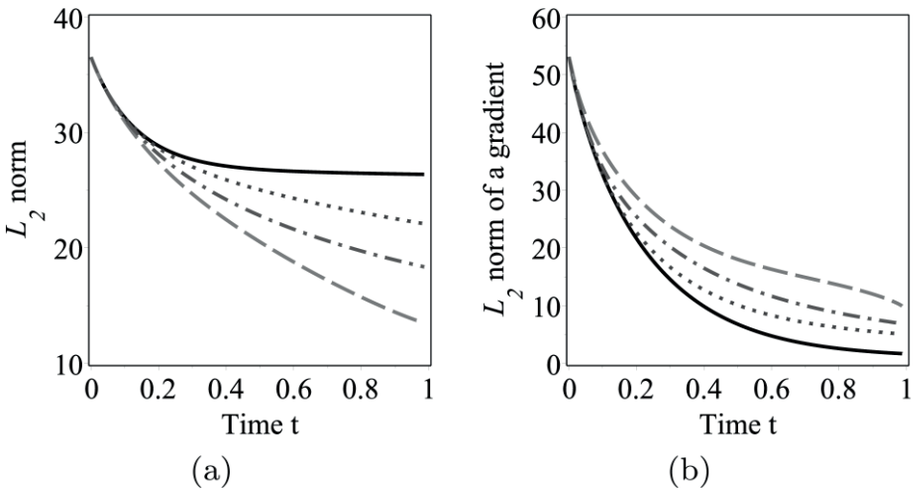


Рис. 1. Результат численного решения задачи управления. Норма в L_2 отклонения температуры от заданной и норма градиента температуры

Работа выполнена при поддержке фонда Александра фон Гумбольдта (Германия) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 15-01-00827).

Литература

1. *Gavrikov A.A., Kostin G.V.* Boundary control of heat transfer processes in a cylindrical body // Proc. of 22nd Int. Conf. on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR). 2017. P. 192–196.
2. *Kostin G.V., Saurin V.V.* Integrodifferential Relations in Linear Elasticity. Berlin: De Gruyter, 2012. 280 p.
3. *Гавриков А.А., Костин Г.В.* Процессы теплообмена в цилиндрическом теле, окруженном воздухом // Труды 59-й научной конференции МФТИ. Аэрофизика и космические исследования. 2017. С. 27–28.

УДК 517.977.56 + 534.11

Об управлении движениями одномерной стержневой системы с граничной нагрузкой

Л.Д. Акуленко[1,2], А.А. Гавриков[1]

[1]Институт проблем механики им. А.Ю. Ашлинского РАН
[2]Московский физико-технический институт (государственный университет)

Рассматривается одноосная управляемая гибридная система, содержащая элементы с сосредоточенными и распределенными параметрами: двухмассовая система с упруго-инерционной связью между телами, к которым прилагаются управляющие воздействия. Одно из тел или (и) управлений могут отсутствовать. К упругой части системы также может быть приложено распределенное силовое воздействие. Схематически механическая модель прямолинейного движения вдоль оси OX представлена в виде рис. 1. Здесь M_0, M_l – сосредоточенные массы, соединенные упругим элементом (стержнем) Ol с распределенными переменными – линейной плотностью ρ и жесткостью σ. К массам и элементу прилагаются внешние силы F_0, F_l и f. Эти воздействия считаются управляющими и используются для приведения системы из известного начального (при $t = t_0$) состояния движения в требуемое конечное (при $t = T$).

Приведем математическую постановку задачи управления движением дискретно-континуальной системы, схематически описанной выше

$$\begin{gathered}\rho(x)\ddot{u}=(\sigma(x)u')'+f(x,t),\quad u=u(x,t),\quad 0<x<l,\\ M_0\ddot{u}(0,t)=\sigma(0)u'(0,t)+F_0(t),\quad M_l\ddot{u}(l,t)=-\sigma(l)u'(l,t)+F_l(t),\\ u(x,t_0)=g^0(x),\quad \dot{u}(x,t_0)=h^0(x);\quad t_0\le t\le T<\infty,\\ 0<\rho^-\le\rho(x)\le\rho^+<\infty,\quad 0<\sigma^-\le\sigma(x)\le\sigma^+<\infty.\end{gathered}\tag{1}$$

Здесь u – абсолютное смещение сечения x в момент времени t, его движение описывается первым уравнением. Второе и третье уравнения (типа Ньютона) описывают движения сосредоточенных масс M_0 и M_l соответственно под действием сил упругости и управления. Начальный t_0 и конечный $T>t_0$ моменты времени t считаются фиксированными. Ставится задача приведения системы (1) в состояние заданного движения при $t=T$ посредством управляющих воздействий F_0, F_l, f физически реализуемого класса гладкости.

Используя модальный подход, задача (1) сводится к задаче управления бесконечномерной системой ОДУ

$$\begin{gathered}\ddot{\theta}_n+\lambda_n\theta_n=\phi_n(t);\quad \phi_n\equiv f_n(t)+X_n(0)F_0(t)+X_n(1)F_1(t);\\ f_n(t)=(f(x,t),X_n(x))_\chi,\\ \theta_n(t_0)=\theta_n^0=(g^0(x),X_n(x))_\chi,\quad \dot{\theta}_n(t_0)=\dot{\theta}_n^0=(h^0(x),X_n(x))_\chi,\\ u(x,t)=\sum_{n=0}^{\infty}\theta_n(t)X_n(x),\quad 0\le x\le 1,\quad t\ge t_0.\end{gathered}\tag{2}$$

Здесь собственные значения $\lambda\ge 0$ (частоты $\omega=\sqrt{\lambda}$) и формы $X(x)$ получаются в результате решения [1] обобщенной краевой задачи, где неизвестный параметр λ входит в краевые условия

$$\begin{gathered}(\sigma X')'+\lambda\rho X=0,\quad 0<x<1,\quad (u=e^{i\omega t}X, l=1),\\ M_0\lambda X(0)+\sigma(0)X'(0)=0,\quad M_1\lambda X(1)-\sigma(1)X'(1)=0.\end{gathered}$$

Скалярное произведение определяется следующим образом:

$$(f,g)_\chi=\int_0^1 f(x)g(x)\chi(x)dx,\quad \chi=\rho(x)+M_0\delta(x)+M_1\delta(1-x)\,.$$

Содержательную в прикладном аспекте представляет постановка задачи управления низшими модами движения (обычно $n=0,1$), а высшие моды (относительных колебаний) не учитываются вследствие их незначительности и сравнительно быстрого затухания (отметим, что к конечномерному варианту задачи (2), при дополнении ее условиями минимизации соответствующего функционала, могут быть применены стандартные методы построения линейно-квадратичного регулятора [2]). Решение задачи с требуемой точностью достигается посредством гладкого по В.А. Стеклову малого управляющего воздействия на достаточно большом интервале времени $T>>2\pi/\omega_1$.

Предположим, что высшие моды колебаний отсутствуют вследствие наличия естественной диссипации $n^*=1,\ g_m^0=0,\ h_m^0=0,\ m\ge 1$. Зафиксируем величину $T=20\,\pi/\omega_1$; для приведения нулевой моды в состояние покоя положим в медленных переменных $\kappa=\varepsilon t$

$$\phi_0(\kappa)=\begin{cases}-A_1\sin^3\omega\kappa, & 0\le\kappa\le\theta_0,\\ A_2\sin^3\omega(\kappa-\theta_0), & \theta_0\le\kappa\le\Theta,\quad \Theta=\varepsilon T,\\ 0, & \kappa>\Theta,\end{cases}$$

где

$$\omega = \frac{\pi}{\theta_0}, \quad \theta_0 = \frac{\Theta}{2}, \quad A_1 = \frac{3\pi}{4T^2}\left(3Th_0^0 + 4g_0^0\right), \quad A_2 = \frac{3\pi}{4T^2}\left(Th_0^0 + 4g_0^0\right).$$

Отсюда определяются граничные и распределенное управления

$$\phi_0 = f_0 + \|1\|_\chi^{-2}(F_0 + F_1).$$

При использовании предложенного управления поведение колебательных мод $n \geq 1$ после окончания процесса управления $t > T$ оценивается (см. [3]) как асимптотически малые величины

$$|\theta_n(t)| = \varepsilon^{K+1}\omega_n^{-(K+2)}O(\phi_n^{K+1}), \quad |\dot{\theta}_n(t)| = \varepsilon^{K+1}\omega_n^{-(K+1)}O(\phi_n^{K+1}).$$

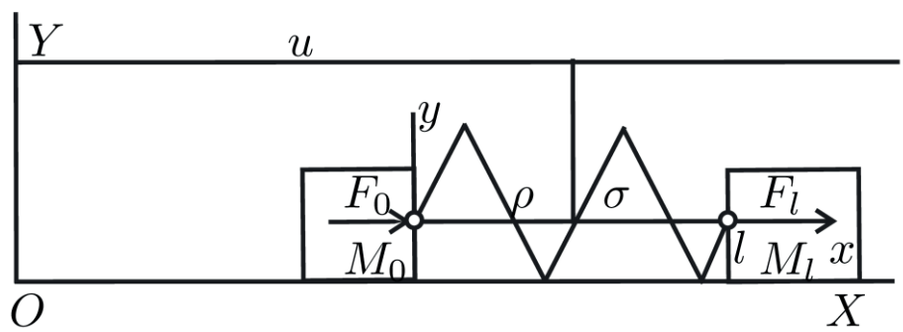


Рис. 1. Схема управляемой гибридной системы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-11-10343).

Литература

1. *Акуленко Л.Д., Гавриков А.А., Нестеров С.В.* Синтез неоднородной упругой системы с граничной нагрузкой // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 1. Матем. Мех. 2017. № 5, 36–42.
2. *Gavrikov A.A.* An iterative solution approach to eigenvalue problems for linear hamiltonian systems and its application to a hybrid system control problem // Proc. of 22nd Int. Conf. on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR). 2017. P. 588–593.
3. *Акуленко Л.Д.* Квазистационарное финитное управление движением гибридных колебательных систем // ПММ. 1991. Т. 55. Вып. 2. С. 183–192.

УДК 534 + 519.624

О решении задач на собственные значения для линейных гамильтоновых систем

А.А. Гавриков

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

Предложен численно-аналитический метод решения самосопряженных краевых задач на собственные значения и функции для линейных гамильтоновых систем с нелинейной зависимостью от спектрального параметра. Представленный подход основан на ньютоновской итерационной процедуре со спектральной коррекцией. Показана сходимость метода, получены двусторонние оценки искомого собственного значения. Данный подход [1] обобщает метод ускоренной сходимости [2], разработанный для краевых задач Штурма–Лиувилля (в том числе для векторных нелинейных по параметру задач Штурма–Лиувилля [3–6] и скалярных с зависящими от параметра краевыми

условиями [7]) и позволяет эффективно решать спектральные краевые задачи для распределенных многомерных систем типа неоднородных стрежней, трубопроводов и т. д.

Основная идея метода состоит в предположении, что собственные значения гладким образом зависят от длины интервала, на котором рассматривается краевая задача. В этом случае при малом изменении длины интервала собственные значения также изменяются на малую величину и возможно предложить процедуру коррекции собственного значения, используя величину производной спектрального параметра по длине интервала. Такое допущение соответствует хорошо известному, справедливому для многих реальных механических систем (например, стержней, струн и т.д.), экспериментальному наблюдению [2] о малом изменении собственных частот при малой вариации параметра длины.

На первом этапе для некоторой величины спектрального параметра, достаточно близкой к искомому собственному значению, проводится стандартная процедура стрельбы: рассматривается матричная задача Коши для линейной гамильтоновой системы и ищутся решения с линейно независимыми начальными условиями. Построенные решения используются для нахождения соответствующего приближения собственной функции, вычисления производной собственного значения по длине интервала и расчета поправки. Далее процедура повторяется.

Практическая сходимость метода определяется по критерию попадания в правый конец интервала и малости величины относительной погрешности вычисления собственного значения.

Метод протестирован на имеющих аналитическое решение задачах, а также известных в литературе численных примерах. Проведены расчеты низших собственных частот неоднородных стержней с дефектами в моделях Эйлера–Бернулли, Рэлея и Тимошенко и для модели вращающегося трубопровода с протекающей идеальной жидкостью.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-31-60078-мол_а_дк.

Литература

1. *Gavrikov A.A.* An iterative solution approach to eigenvalue problems for linear hamiltonian systems and its application to a hybrid system control problem // Proc. of 22nd Int. Conf. on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR). 2017. P. 588–593.
2. *Akulenko L.D., Nesterov S.V.* High-Precision Methods in Eigenvalue Problems and their Applications. Boca Raton: Chapman and Hall/CRC, 2004. 260 p.
3. *Гавриков А.А.* Решение векторной краевой задачи Штурма–Лиувилля с нелинейной зависимостью от спектрального параметра // Тр. 59-й научн. конф. МФТИ. Аэроф. и косм. иссл. М.: МФТИ, 2016. С. 29–31.
4. *Акуленко Л.Д., Гавриков А.А., Нестеров С.В.* Собственные колебания многомерных нелинейных по спектральному параметру систем // ДАН. 2017. Т. 472. № 6. С. 654–658.
5. *Акуленко Л.Д., Гавриков А.А., Нестеров С.В.* Численное решение нелинейных по спектральному параметру векторных задач Штурма–Лиувилля с условиями Дирихле // ЖВММФ. 2017. Т. 57. № 9. С. 105–118.
6. *Gavrikov A.* Numerical solution of vector Sturm-Liouville problems with a nonlinear dependence on the spectral parameter // AIP Conference Proceedings. 2017. V. 1863. № 1. P. 560032-1-560032-4.
7. *Акуленко Л.Д., Гавриков А.А., Нестеров С.В.* Синтез неоднородной упругой системы с граничной нагрузкой // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 1. Матем. Мех. 2017. № 5, 36–42.

УДК 535.4

Сравнение дифракционной эффективности амплитудных и фазовых голограмм

Л.Ю. Меркушов

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Электромагнитное поле, полученное при освещении голограммы [1] когерентным источником света, можно представить в виде суперпозиции полей различных порядков дифракции. Только поле первого порядка дифракции содержит изображение, записанное на голограмму. Остальные (побочные) порядки дифракции не несут полезной информации об изображении. Несмотря на то, что возникновения побочных порядков невозможно избежать, их влияние меняется в зависимости от вида голограммы. Поэтому важной характеристикой голограмм является дифракционная эффективность – отношение мощности дифрагированной волны первого порядка к мощности излучения, освещающего голограмму.

Во многих приложениях голографии необходимо восстановить максимально яркое изображение. Например, при печати изображений на подложке предъявляются жесткие требования ко времени травления, которое обратно пропорционально мощности падающей волны. При заданной мощности источника излучения голограмма с высокой дифракционной эффективностью позволяет снизить время травления. Кроме того, низкая дифракционная эффективность ведет к увеличению яркости остальных порядков дифракции, которые могут искажать восстановленное изображение.

В настоящей работе на основе методов расчета дифракции электромагнитных волн [2, 3] была создана программа, позволяющая записать и восстановить тестовое изображение с голограммы. Получены оценки дифракционной эффективности амплитудных и фазовых голограмм для тестового изображения в зависимости от параметров голограммы: размера ячеек голограммы; допустимого диапазона изменения фазы и амплитуды ячеек голограммы.

Также в работе приводится сравнение результатов численного моделирования с аналитическими оценками дифракционной эффективности для непрерывных и дискретных типов амплитудных и фазовых голографических решеток [4].

Литература

1. *Gabor D.* A new microscopic principle // Nature. 1948. V.161, P. 777–778.
2. *Joseph W Goodman* Introduction to Fourier Optics. Greenwood Village: Roberts and Company Publishers, 2005. 491 c.
3. *Nascov V, Logofatu P.C.* Fast computation algorithm for the Rayleigh–Sommerfeld diffraction formula using a type of scaled convolution // Applied Optics. 2009. V. 48, Iss. 22 P. 4310.
4. *Кольер Р., Лин Л., Берхарт К.* Оптическая голография. М.: Мир, 1973. 686 с.

УДК 681.51

Нечеткое управление движением колесного мобильного робота при наличии препятствий

М. Алхаддад

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Колесные мобильные роботы (WMR) используются в автоматизации промышленных процессов и в других областях, таких как сельское хозяйство. Управление движением WMR было и остается предметом многочисленных исследований таких, как в работах [1] и [2]. В данной работе рассмотрено нечеткое управление движением мобильного робота при наличии препятствий. Система управления движением мобильного

робота отслеживает его положение и вычисляет координаты текущей опорной точки, к которой должен двигаться робот, избегая столкновений с препятствиями. Это исследование представляет собой эффективную навигационную архитектуру, которая объединяет контроллеры «go-to-goal» и «избежание столкновений с препятствиями» в полную навигационную систему. Реализация нечёткого регулятора системы управления и моделирования выполнена в среде графического программирования MATLAB и SIMIAM.

Используемый мобильный робот «QuikBot» показан на рис. 1 и снабжен двигателем постоянного тока, пятью инфракрасными (ИК) датчиками для измерения расстояния до препятствий и двумя оптическими кодами для обеспечения фактического положения и скорости.

Кинематическая модель колесного робота «QuickBot» выглядит следующим образом [1]:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= V_B \cos\theta, \\ \dot{y} &= V_B \sin\theta, \\ \dot{\theta} &= \omega, \end{aligned} \tag{1}$$

где (x, y) – координаты колесного робота на плоскости, θ – курс робота, т.е. угол поворота робота на плоскости, V_B – линейная скорость робота, ω – угловая скорость. Предположим, что робот находится в позиции ($x = 0$, $y = 0$, $\theta = 0$), и целевая точка находится в ($x_d = 0$, $y_d = -1$, θ_d) , где θ_d – угол азимут, т.е. угол между осью OX и направлением на цель, задается следующим образом:

$$\theta_d = \arctan\left(\frac{y_d - y}{x_d - x}\right). \tag{2}$$

Необходимо определить закон управления мобильным роботом, который переведет его из начального положения в целевую точку, т.е. расстояние до целевой точки и разность между курсом и азимутом стремились к нулю.

Нечёткий регулятор – это регулятор, построенный на базе нечеткой логики [3]. Регулятор управляет углом робота, чтобы разность между ним и углом целевой точки стремилась к нулю, т. е. $\theta_d = 0$. Функция принадлежности сигнала входа и выхода показаны на рис. 2. Сигнал входа указывает на желаемый угол для робота, а сигнал выхода – на угловую скорость робота.

Продукционные правила нечетной логической системы будут следующими:

Если *вход NL,* ***ТО*** *выход NL;* ***Если*** *вход NS,* ***ТО*** *выход NS;* ***Если*** *вход S,* ***ТО*** *выход S;* ***Если*** *вход PS,* ***ТО*** *выход PS;* ***Если*** *вход PL,* ***ТО*** *выход PL.*

Избежание столкновений обеспечивается движением в противоположном направлении по отношению к препятствиям, однако при этом робот не достигнет целевой точки, поэтому необходим синтез регулятора, чтобы достичь цели и избежать нежелательных столкновений. Для этого направление робота должно включить в себя позицию целевой точки и препятствия, что задается следующим образом:

$$U_{GTG,AO} = \alpha U_{GTG} + (1-\alpha) U_{AO}, \quad \alpha \in [0,1], \tag{3}$$

где U_{GTG} – вектор движения прямо в целевую точку и U_{AO} – вектор движения напротив препятствия. Имитации движения робота от текущей позиции до целевой точки показаны на рисунке рис. 3. Очевидно, что робот начал движение из позиции ($x = 0$, $y = 0$, $\theta = 0$) и достиг целевую точку ($x_d = 0$, $y_d = -1$), избегая столкновений с препятствиями. Угол поворота робота θ и его эталонное значение показаны на рис. 4.

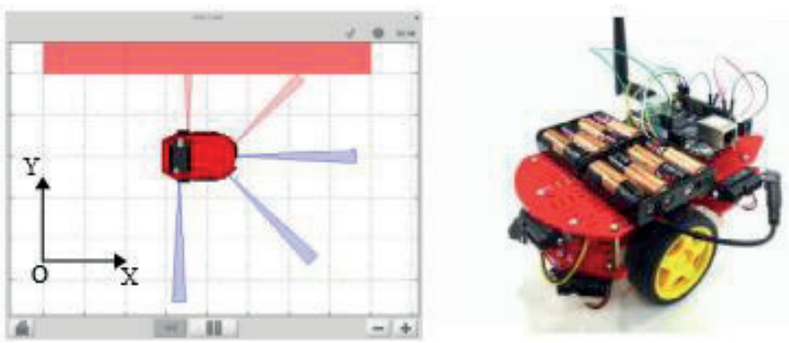
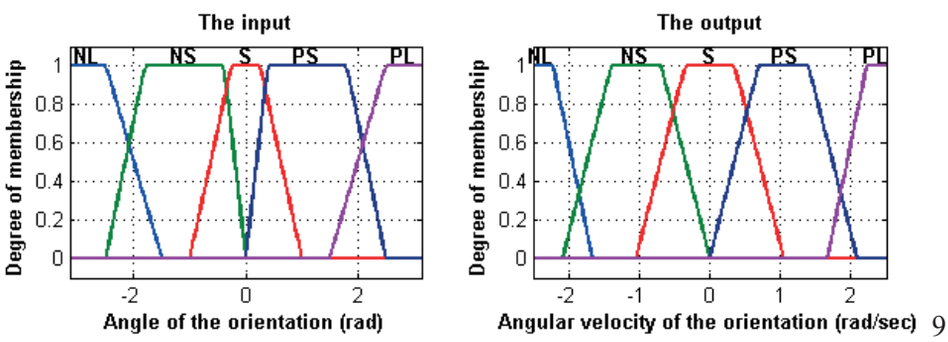


Рис.1. QuickBot – колесный мобильный робот



9

Рис. 2. Функции принадлежности сигналов регулятора

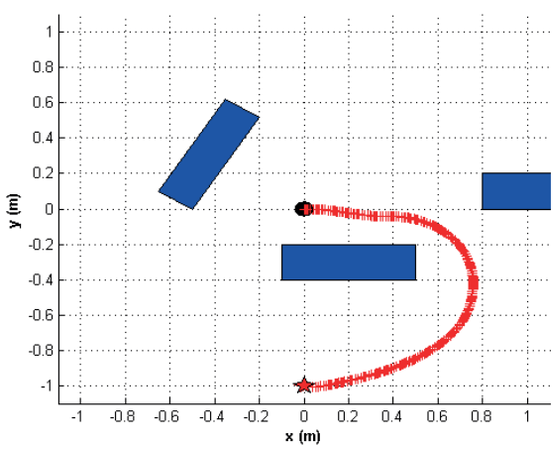


Рис. 3. Маршрут робота при наличии препятствий

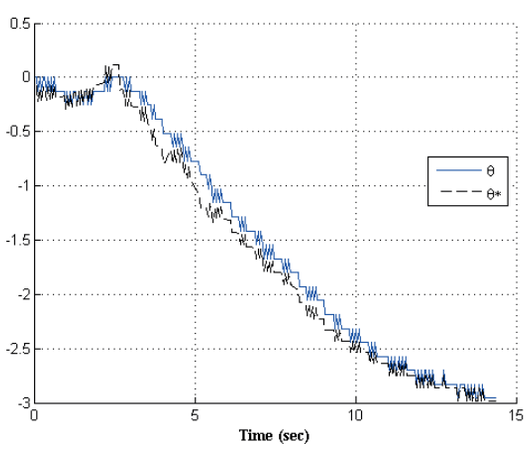


Рис. 4. Угол поворота и его эталонное значение

Литература

1. *Дуньюэ Ц.* Управление мобильным роботом на основе нечетких моделей //Актуальные проблемы современной науки. 2012. № 2. С. 168–176.
2. *Герасимов В.Н., Михайлов Б.Б.* Решение задачи управления движением мобильного робота при наличии динамических препятствий // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. С. 83–92.
3. *Andrzej P.* Fuzzy modeling and control. Heidelberg: Springer, 2001. P. 733.

УДК 51-77

Асимптотический анализ в задаче об оценке стоимости опциона в модели со случайной волатильностью

Е.Г. Земцова

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Предлагается рассмотреть европейский опцион со случайной волатильностью. Цель работы заключается в том, чтобы оценить стоимость опциона в такой модели.

Цена любого актива удовлетворяет СДУ: $dS_t = \mu S_t dt + \sigma_t S_t dW_t$, где μ – тренд, σ_t – процесс волатильности, W_t – винеровский процесс.

Возьмем $\sigma_t = f(Y_t)$, где $f(Y_t) = f(y)$ – функция от процесса Орнштейна–Уленбека. Процесс удовлетворяет СДУ: $dY_t = \alpha(m - Y_t)dt + \beta d\tilde{Z}_t$, где предполагаем, что α, β – положительные константы, m – среднее процесса, $\tilde{Z}_t = \rho W_t + \sqrt{1-\rho^2} Z_t$, где ρ – корреляционный параметр, а W_t и Z_t – независимые винеровские процессы.

Закон распределения процесса Y_t имеет следующий вид:

$$Y_t \sim N\left(m + (Y_0 - m)e^{-\alpha t}, \quad \frac{\beta^2}{\alpha}\left(1 - e^{-2\alpha t}\right) \right),$$

можно утверждать, что при $t \to \infty$ $Y_t \sim N\left(m, \frac{\beta^2}{\alpha} \right)$.

Обозначим цену опциона в момент t за $P = P(S_t, Y_t, t)$, K – цену исполнения, T – время исполнения, $h(S_T) = (S_T - K)^+$ – функцию выплат, и пусть r(t) – безрисковая ставка, которую считаем постоянной. Используя принцип безарбитражности рынка и двумерную формулу Ито, можно утверждать, что ценовая функция P удовлетворяет следующему УРЧП [1]:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{1}{2} f^2 S^2 \frac{\partial^2 P}{\partial S^2} + \rho\beta S f \frac{\partial^2 P}{\partial S \partial y} + \frac{1}{2}\beta^2 \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + r\left(S\frac{\partial P}{\partial S} - P \right) + \alpha(m - y)\frac{\partial P}{\partial y} = 0, \tag{1}$$

с граничными условиями $P(S, y, t) = h(S)$ и $\begin{cases} 0 \le t \le T \\ S > 0, \ y \in R \end{cases}$.

Чтобы разрешить уравнение (1), введем два предположения:

1. Пусть случайная волатильность определяется формулой:

$$\sigma(y) = f(y) = C + \varepsilon\varphi(y),$$

где $\varphi(y)$ – финитная функция от случайного процесса Орнштейна–Уленбека, C – постоянная, ε – малая величина.

2. Разложим цену рассматриваемого опциона $P = P(S_t, Y_t, t)$ в ряд по ε:

$$\mathrm{P}(S_t,\ Y_t,\ \mathrm{t}) = \mathrm{P}_0(S_t,\ \mathrm{t}) + \varepsilon \mathrm{P}_1(S_t,\ Y_t,\ \mathrm{t}).$$

Учитывая предположения при подстановке в уравнение (1), выпишем приближения цены опциона по ε. Получим, что при первом приближении уравнение примет вид

$$\frac{\partial P_0}{\partial t} + \frac{1}{2} C^2 S^2 \frac{\partial^2 P_0}{\partial S^2} + r\left(S\frac{\partial P_0}{\partial S} - P_0 \right) = 0.$$

Это дифференциальное уравнение Блэка–Шоулса. Из него определяем $\mathrm{P}_0(S_t,\ \mathrm{t})$.

При втором приближении по ε получаем уравнение

$$\frac{\partial P_1}{\partial t}+\frac{1}{2}C^2S^2\frac{\partial^2 P_1}{\partial S^2}+\frac{1}{2}\beta^2\frac{\partial^2 P_1}{\partial y^2}+r\left(S\frac{\partial P_1}{\partial S}-P_1\right)+\alpha\left(m-y\right)\frac{\partial P_1}{\partial y}=-C\varphi S^2\frac{\partial^2 P_0}{\partial S^2} \qquad (2)$$

Чтобы разрешить уравнение (2), потребуется ввести логарифмическую замену цены базового актива, применить предположения, изложенные в статье [2], и использовать принцип Дюамеля. Тогда получим результат:

$$P_1\left(\mathrm{t},\ \mathrm{x},\mathrm{y}\right)=\int_0^t\int_{x'}\int_{y'}W\left(t;t',x,y,x',y'\right)f\left(t',x',y'\right)\mathrm{dt'dx'dy'},$$

где $f\left(t',x',y'\right)=-C\varphi S^2\frac{\partial^2 P_0}{\partial S^2}$, $C=\mathrm{const}$, $\varphi=\varphi\left(y\right)$, $P_0=P_0\left(\mathrm{S},\mathrm{t}\right)$, $x=\ln S$,

$$W=\exp\left\{x^TG(t)x+q^T(t)x+k(t)\right\}N(t)exp\left\langle P^{-1}(t)(x-n(t;z),(x-n(t;z))\right\rangle,$$

где матрицы *G(t)*, *P(t)*, вектора *q(t)*, *n(t;z)* и числа *k(t)*, *N(t)* известны (найдены из решения вспомогательных ОДУ из предположений [2]).

Литература

1. *Achdou Y., Pironneau O*. Computational methods for option pricing // Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM). 2005. P. 316.
2. *Чечкин А.Г* Явный вид фундаментального параболического дифференциального оператора второго порядка // Пробл. мат. анализа. 2015. В. 81. С. 179-188.
3. *Олейник О.А.* Лекция об уравнениях с частными производными. Москва.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. 260 с.

УДК 539.3

Анализ устойчивости и граничной управляемости системы, описываемой уравнением трубопровода с движущейся жидкостью

В.В. Черник

Институт проблем механики им. А.Ю. Ашлинского РАН

Первые исследования взаимодействия потока жидкости или газа с трубопроводом были выполнены Е. Л. Эшли, Дж. Хевилендом и В.И. Феодосьевым в середине XX века. Малые поперечные колебания $u=u(t,x)$ $\left(0<x<2\pi,t>0\right)$ вязкоупругого трубопровода в некоторой плоскости в безразмерных переменных описываются уравнением [1–3]

$$\ddot{u}+a\dot{u}''''+2\beta v\dot{u}'+k_0\dot{u}+u''''+v^2u''-\int_0^t a\left(t-\tau\right)u''''\left(\tau,x\right)d\tau=0. \qquad (1)$$

В уравнении (1) параметры α,β,k_0,v положительны, v пропорционален скорости течения жидкости в трубе, α – внутреннему трению в трубе, β – плотности движущейся жидкости, k_0 – трению внешней среды, интегральный член моделирует наследственные свойства среды. Полагаем, что концы трубы закреплены шарнирно:

$$u(t,0)=u''(t,0)=u(t,2\pi)=u''(t,2\pi)=0.$$

Начальные условия для уравнения (1) не ставятся, поскольку для анализа устойчивости и управляемости требуется определить спектр уравнения.

В качестве критерия устойчивости используется критерий отсутствия точек спектра с положительной действительной частью. Показано, что при достаточно малых значениях параметра v система устойчива, однако, при увеличении этого параметра некоторые точки спектра из левой полуплоскости сдвигаются в правую. Известны две разные формы потери

устойчивости: дивергенция и флаттер. С точки зрения спектрального анализа, потеря устойчивости в форме флаттера возникает, когда две сопряженные точки спектра одновременно выходят в открытую полуплоскость $\mathrm{Re}\,\lambda > 0$. Потеря устойчивости в форме дивергенции возникает, когда действительная точка спектра, двигаясь по действительной оси, переходит на её положительную часть, этот случай потери устойчивости имеет место для исследуемой системы при условии $\beta = 0$. Для определения характера потери устойчивости построена картина спектра системы (1) без члена $2\beta v\dot{u}'$. Установлено, что критерием устойчивости системы являются неравенства

$$\lambda_0 < a_1,\ v \le \sqrt{1 - \frac{a_1}{\lambda_0}}\,.$$

Спектральный анализ исходного уравнения представляется гораздо более сложной задачей из-за наличия члена с первой производной по пространственной переменной. Однако в работе А. И. Милославского [4] было показано, что количество точек спектра с положительной действительной частью не зависит от параметра β.

Управляемость рассматриваемой системы исследуется в следующем смысле: если для любых начальных состояний за конечное время можно привести систему в заданное состояние (например, в полный покой), прилагая ограниченное управляющее воздействие к границе отрезка, на котором определена система, то система считается управляемой. В противном случае система неуправляема. Работа по исследованию управляемости систем с запаздыванием была проведена И. В. Романовым и А. С. Шамаевым на основе характеристики густоты спектра [5]. Пусть $n(t)$ – количество точек спектра уравнения в круге с центром в нуле радиуса t. Тогда характеристика густоты спектра a^* определяется следующим образом:

$$a^* \equiv \overline{\lim_{r\to+\infty}} \frac{\pi}{r} \int_o^r \frac{n(t)}{t}\,dt\,.$$

Характеристика густоты спектра a^* является оценкой снизу для времени оптимального быстродействия приведения в покой системы:

$$\ddot{u} + a\dot{u}'''' + k_0\dot{u} + u'''' + v^2 u'' - \int_0^t a(t-\tau)u''''(\tau,x)d\tau = 0\,,$$

$$u(t,0) = \theta(t)\,,$$

$$u(t,2\pi) = u''(t,2\pi) = 0\,.$$

В работе с помощью численного моделирования показано, что при увеличении скорости движения жидкости в трубопроводе с шарнирным закреплением концов устойчивость системы теряется по типу «дивергенция», т.е. на левую полуплоскость выходит одно вещественное собственное значение. Получен критерий устойчивости в терминах параметров исходной задачи. Присутствие в системе трения Кельвина–Фойгхта не изменяет зоны устойчивости в пространстве параметров задачи, а присутствие интегрального последействия только уменьшает указанную зону, что на первый взгляд может показаться парадоксальным.

Показано также, что при $\beta = 0$ наличие как последействия в системе, так и трения Кельвина-Фойгхта приводит к потере полной граничной управляемости системы. Дальнейшие исследования, как мы предполагаем, будут связаны с вопросами построения картины спектра для полного уравнения (1), а также с доказательством отсутствия полной граничной управляемости системы, задаваемой уравнением (1).

Литература

1. *Ashley H., Haviland G.* Bending vibrations of a pipeline containing flowing fluid // *Journal of Applied Mechanics. 1950. N* 17. P. 229–232.
2. *Феодосьев В.И.* О колебаниях и устойчивости трубы при протекании через нее жидкости // *Инж. сборник.* 1952. Т. 10, С. 169–170.
3. *Paidoussis M.P., Issid N.T.* Dynamic stability of pipes conveying fluid // *Journal of Sound and Vibrations.* 1974. *N* 33(3), P. 267–294.
4. *Милославский А.И.* О спектре неустойчивости операторного пучка // Математические заметки. 1991. Т. 49(4). С. 88–94.
5. *Романов И.В., Шамаев А.С.* О задачах распределенного и граничного управления некоторыми системами с интегральным последействием // Труды семинара им. И.Г. Петровского. 2016. № 31. 135–158.
6. *Акуленко Л.Д., Коровина Л.И., Нестеров С.В.* Поперечные колебания трубопровода с равномерно движущейся жидкостью // Докл. РАН. 2009. Т. 427. № 6. С. 1–4.

УДК 519.642.4

Решение интегральных уравнений в задаче моделирования ползучей слоистой среды

А.С. Шамаев, Д.Ю. Князьков

Институт проблем механики им. А.Ю. Ашлинского РАН

В работах по теории усреднения разрабатываются различные методы нахождения усредненных характеристик композитной среды, состоящей из материалов с различными физическими свойствами. В классических работах [1–3] рассматриваются модели, определяемые уравнениями в частных производных. В более поздних работах рассматриваются также среды, поведение которых описывается интегро-дифференциальными соотношениями. Так, например, процедура усреднения для среды с периодической структурой, состоящей из двух вязкоупругих компонент, была предложена в [4], где для нахождения эффективных характеристик усредненной среды было необходимо решать довольно сложные уравнения на ячейке периодичности. В работе [5] для слоистой двухкомпонентной ползучей среды был предложен другой подход, в соответствии с которым задача нахождения усредненных параметров сводится к решению одномерных интегральных уравнений. Настоящая работа посвящена численному решению таких интегральных уравнений.

В среде Mathematika была написана подпрограмма, численно решающая уравнения Фредгольма второго рода. Правильность работы этой программы была подтверждена расчетами для некоторых аналитических, в том числе экспоненциальных ядер свертки, а также для ядра, заданного Э-функцией Работнова [6]. У такой функции в нуле – интегрируемая особенность. Э-функции появляются в рассматриваемой задаче в связи с необходимостью обращать исходные соотношения, задающие связь напряжений и деформаций, в случае, когда ядра ползучести являются ядрами Абеля. В расчетной программе Э-функции выражались через обобщенную функцию Миттаг–Леффлера [7].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-01-00412.

Литература

1. *Sanchez-Palencia E.* Non-Homogeneous Media and Vibration Theory. New York, Springer-Verlag, 1980.
2. *Бахвалов Н.С., Панасенко Г.П.* Осреднение процессов в периодических средах. Математические задачи механики композиционных материалов. М., Наука, 1984.
3. *Олейник О.А., Иосифьян Г.А., Шамаев А.С.* Математические задачи теории сильно неоднородных упругих сред. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990.
4. *Orlik J.* Transmission and Homogenization in Hereditary Viscoelasticity with Aging and Shrinkage.

Berichteraus der Mathematik, D386 (Dissertation). Aachen, Shaker Verlag, 2000.
5. *Шамаев А.С., Шумилова В.В.* Усреднение уравнений состояния для гетерогенной среды, состоящей из слоев двух ползучих материалов // Тр. МИАН. 2016. Т. 295. С. 229–240.
6. *Работнов Ю.Н.* Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. 753 с.
7. *Gorenflo, R., Kilbas A., Mainardi F., Rogosin S.* Mittag–Leffler Functions, Related Topics and Applications: Theory and Applications. Aachen, Springer, 2014.

УДК 536.242, 536.253

Моделирование управляемого нагрва цилиндрического тела при наличии неравномерного конвективного теплообмена с окружающей средой

Д.Ю. Князьков[1], Г.В. Костин[1,2]

[1]Институт проблем механики им. А.Ю. Ашлинского РАН
[2]Московский физико-технический институт (государственный университет)

Задача моделирования термодинамических процессов в телах несложной формы важна для построения оптимального управления нагревом и охлаждением таких тел [1–3]. В настоящей работе моделируется управляемый нагрев теплоизолированного с обоих концов горизонтально или вертикально ориентированного цилиндра. Этот цилиндр нагревается двумя элементами Пельтье, установленными на торцах, и контактирует с окружающим воздухом по всей его боковой поверхности. Ранее было установлено [4, 5], что в такой постановке наибольший вклад в теплообмен между цилиндром и окружающей средой вносит конвективный теплообмен. Коэффициент конвективного теплообмена будет отличаться при изменении ориентации контактирующей с окружающей средой поверхности. Более того, значение этого коэффициента существенно меняется в различных частях поверхности теплообмена [6]. Это значение будет зависеть от продольной координаты для вертикально ориентированного цилиндра и от угловой координаты для горизонтально ориентированного цилиндра. В настоящей работе изучается влияние неоднородности значения коэффициента конвективного теплообмена на процессы управляемого нагрева цилиндрических тел, сделанных из материалов с различной теплопроводностью.

Для идентификации физических параметров – среднего коэффициента теплообмена и параметров работы нагревающих элементов Пельте – на кафедре Мехатроники Университета г. Росток, Германия, сотрудниками этой кафедры, А. Раухом и Ю. Керстен, была собрана соответствующая установка и проведены необходимые эксперименты. Полученные экспериментальные данные использовались для дальнейшего моделирования. В настоящей работе проведено численное моделирование процесса управляемого нагрева для алюминиевого и стеклянного цилиндров при различных ориентациях: горизонтальной и вертикальной.

Было установлено, что учет влияния непостоянства коэффициента конвективного теплообмена на боковой поверхности цилиндра приводит к заметному изменению температуры в точках, расположенных у его поверхности, в процессе управляемого нагрева цилиндрического стеклянного тела. Это изменение фиксируется как при горизонтальной, так и при вертикальной ориентации цилиндра. Однако аналогичные численные эксперименты, проведенные для алюминиевого цилиндра, показывают, что в этом случае различия в значениях температуры практически отсутствуют. Все существенные для описываемого моделирования физические свойства стекла и алюминия практически совпадают, за исключением теплопроводности. Значение теплопроводности стекла на два порядка меньше значения теплопроводности алюминия. Таким образом, можно сделать вывод, что непостоянство коэффициента конвективного теплообмена по поверхности тела существенно влияет на температуру цилиндрического тела в процессе управляемого нагрева, но только если это тело обладает достаточно малой теплопроводностью. Полученные результаты могут быть использованы при

моделировании и построении более сложных законов управления нагревом цилиндрического тела [7].

Литература

1. *Butkovsky A.G.* Theory of Optimal Control of Distributed Parameter Systems. New York: Elsevier. 1969.
2. *Chernousko F.L., Ananievski I.M., Reshmin S.A.* Control of Nonlinear Dynamical Systems: Methods and Applications. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag. 1996.
3. *Rauh A., Kersten J., Aschemann H.* Robust Control for a Spatially Three-Dimensional Heat Transfer Process // IFAC-PapersOnLine. 2015. V. 48. No. 14. P. 101.
4. *Князьков Д.Ю., Костин Г.В., Саурин В.В.* Оценка различных процессов теплообмена между цилиндрическим телом и воздухом // Труды 59-й научной конференции МФТИ. Аэрофизика и космические исследования. 2016. С. 41–42.
5. *Knyazkov D., Kostin G., Saurin, V.* Influence of free convection on heat transfer in control problems for a cylindrical body // Proceedings of the 22nd International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), Miedzyzdroje, Poland. 2017. P. 58.
6. *Аметистов Е.В.* Основы теории теплообмена. М.: Изд-во МЭИ, 2000. 242 с.
7. *Gavrikov A., Kostin G.* Boundary Control of Heat Transfer Processes in a Cylindrical Body // Proceedings of the 22nd International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), Miedzyzdroje, Poland. 2017. P. 192.

УДК 537.872.32+519.63

Расчет дифракции плоской волны на трехмерном периодическом в двух направлениях слое произвольной структуры

Д.Ю. Князьков

Институт проблем механики им. А.Ю. Ашлинского РАН

Рассматривается задача моделирования дифракции плоской электромагнитной волны на плоском слое. Этот слой периодичен в двух направлениях и ограничен по третьему двумя поверхностями произвольной, тоже периодической, формы. Диэлектрическая проницаемость среды задана произвольной функцией. Эта функция может быть даже разрывной. Таким образом, в рамках рассматриваемой модели слоя могут решаться задачи дифракции на решетке, голограмме, поверхности земли или моря, задачи распространения электромагнитной волны в волноводе и многие другие. Требуется найти результат дифракции, то есть электромагнитное поле, в том числе отраженное и прошедшее через слой, коэффициенты отражения, прохождения и поглощения (для поглощающей среды). Таким образом, в указанной постановке могут решаться прямые и обратные [1] задачи дифракции: голографии, где необходимо рассчитывать прошедшую через пластину волну или синтезировать голограмму с заданными свойствами [2]; томографии внутренности слоя, например, детектирования подземных объектов [3], или идентификации формы слоя, например, активной радиолокации поверхности океана [4], требующие нахождения отраженной от слоя волны; определения формы слоя по собственному излучению, например, пассивного радиозондирования морской поверхности [5], где необходимо рассчитывать коэффициент поглощения. Последнее возможно в силу принципа взаимности [6], в соответствии с которым собственное излучение среды в заданном направлении пропорционально доли энергии, поглощенной средой при облучении плоской волной с этого направления.

Решение описанной задачи дифракции волны на слое было приведено ранее в двумерном случае для Н-поляризации [7] и для Е-поляризации. В настоящей работе рассматривается существенно трехмерная постановка. Для расчета результата дифракции предлагается использовать метод, предложенный А.С. Ильинским [8]. Этот метод позволяет свести исходную задачу к системе обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка. Такая система была выписана для комплексной амплитуды

интенсивности электрической компоненты электромагнитного поля. Для решения соответствующей краевой задачи в системе MATLAB была написана программа. Правильность работы программы исследовалась путем сравнения с аналитическими решениями для простейших случаев дифракции на плоском однородном слое и путем сравнения с результатами расчета для двумерного цилиндрического синусоидального слоя в случае Н-поляризации [7]. Численные эксперименты показали высокую точность расчетов: ошибка составляла менее 0.1% для сеток порядка 200–300 точек вдоль каждой координатной оси. Был проведен ряд расчетов для нужд радиотомографии поверхности океана.

Разработанная программа может быть использована в различных, упомянутых выше приложениях, однако время счета в приводимых тестовых расчетах составляет около 40 минут, что недопустимо долго. Таким образом, ближайшей целью является перенос алгоритма на язык программирования C++ для ускорения времени счета и возможности использования программы на суперкомпьютерных вычислителях кластерной, возможно, гибридной архитектуры. Исходные коды упомянутых выше программ доступны для скачивания в сети Интернет по адресу https://bitbucket.org/Jclash/dpproj.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-31-60096 мол-а-дк.

Литература

1. *Kirsch A.* An Introduction to the Mathematical Theory of Inverse Problems. 2nd Edition. New York: Springer, 2011. 538 p.
2. *Борисов М.В., Боровиков В.А., Гавриков А.А, Князьков Д.Ю., Раховский В.И., Челюбеев Д.А., Шамаев А.С.* Методы создания и коррекции качества голографических изображений геометрических объектов с элементами субволновых размеров // Доклады Академии Наук. 2010. Т. 434, N 3. С. 332–336.
3. *Fiaz M.A., Frezza F., Pajewski L., Ponti C., Schettini G.* Scattering by a circular cylinder buried under a slightly rough surface: the cylindrical-wave approach // IEEE Transactions on antennas and propagation. 2012. V. 60(6). P. 2834–2842.
4. *Нестеров С.В., Шамаев А.С., Шамаев С.И.* Методы, алгоритмы и средства аэрокосмической компьютерной томографии приповерхностного слоя Земли. М.: Научный мир, 1996. 272 с.
5. *Гавриков А.А., Князьков Д.Ю., Романова А.В., Черник В.В., Шамаев А.С.* Моделирование влияния волнения поверхности на спектр собственного излучения океана // Программные системы: теория и приложения. 2016. Т. 7, вып. 2(29). С. 73–84.
6. *Левин М.Л., Рытов С.М.* Теория равновесных тепловых флуктуаций в электродинамике. М.: Наука, 1967. 310 с.
7. *Knyazkov D.* Simulation of diffraction on a layer using the method of projections // AIP Conference Proceedings. 2017. V. 1863. P 370006.
8. *Ильинский А.С.* Метод исследования задач дифракции волн на периодической структуре // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1974. Т. 14, N: 4. С. 1063–1067.

УДК 539.3

Об изменениях поврежденности металла под действием высокоэнергетического электромагнитного поля

К.В. Кукуджанов, А.Л. Левитин

Институт проблем механики им. А.Ю. Ашлинского РАН

Изучаются процессы эволюции и взаимодействия дефектов типа плоских межзеренных микротрещин с линейными размерами порядка 10 мкм, протекающие в материале при обработке металлических образцов импульсным высокоэнергетическим электромагнитным полем, вызывающем в материале короткий импульс электрического тока высокой плотности. При воздействии полем на проводник происходит его концентрация на острых вершинах микротрещин, что инициирует протекание электрических, термических и механических процессов в окрестности микродефектов.

Исследование осуществляется численно на основе модели воздействия интенсивным импульсным электромагнитным полем на предварительно поврежденный электротермоупругопластический материал с дефектами, которая учитывает плавление и испарение металла, а также анизотропные зависимости всех его физико-механических свойств от температуры [1]. Получающаяся система уравнений решается МКЭ, перестройка сетки производится на основе смешанного эйлера-лагранжева метода [1–2].

Моделирование показало, что в результате рассматриваемого воздействия происходит сварка берегов трещины и залечивание микродефектов [1–3]. При этом объем микродефектов уменьшается во времени и происходит восстановление сплошности материала, что согласуется с результатами имеющихся экспериментов.

Для макроскопического описания процессов залечивания вводятся параметры залеченности и поврежденности материала [4]. Параметр залеченности определяется как отношение изменения объема микротрещины к начальному объему микротрещины в конкретный момент времени при воздействии на материал электромагнитным полем. Под поврежденностью (пористостью) понимается отношение объема микротрещины в конкретный момент времени к объему представительного элемента. Залечивание микротрещин приводит к увеличению залеченности материала и уменьшению его поврежденности.

Моделирование рассматриваемых процессов во всем исследуемом диапазоне расстояний между дефектами показало, что зависимости залеченности и поврежденности от времени не будут различаться от того, что вычисляем мы их в областях интегрирования, состоящих из одного или же нескольких представительных элементов [3].

Расположение микротрещин друг относительно друга, расстояние между ними, их форма и ориентация практически не влияют на изменения залеченности и поврежденности материала во времени при воздействии на материал током. На эти изменения влияют лишь величины начальной поврежденности материала и начальной «длины» микротрещин [4].

На основе результатов моделирования получены приближенные кусочно-линейные зависимости изменения залеченности и поврежденности от времени и начальной поврежденности материала. Из данных зависимостей следует, что до определенного момента времени все микротрещины в материале (независимо от того, какой была начальная поврежденность материала) не залечиваются, и поврежденность материала не меняется под действием тока. После этого момента времени стартует процесс залечивания микротрещин. При этом под действием тока со временем поврежденность материала уменьшается во времени с постоянной скоростью (которая не зависит от начальной поврежденности), в то время как залеченность растет со скоростью, которая обратно пропорциональна начальной поврежденности материала.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-08-08693).

Литература

1. *Кукуджанов К.В.* Моделирование воздействия высокоэнергетического импульсного электромагнитного поля на микротрещины в поликристаллическом металле // Вестник ПНИПУ. Механика. 2015. № 4. С. 138–158. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.4.09
2. *Kukudzhanov K.V., Levitin A.L.* Modeling the Healing of Microcracks in Metal Stimulated by a Pulsed High-Energy Electromagnetic Field. Part I // Nanomechanics Science and Technology: An International Journal. 2015. V. 6. Iss. 3. P. 233-249. DOI: 10.1615/NanomechanicsSciTechnolIntJ.v6.i3.60
3. *Kukudzhanov K.V., Levitin A.L.* Modeling the Healing of Microcracks in Metal Stimulated by a Pulsed High-Energy Electromagnetic Field. Part II // Nanomechanics Science and Technology: An International Journal. 2016. V. 7. Iss. 2. P. 123–148. DOI: 10.1615/NanomechanicsSciTechnolIntJ.v7.i2.30
4. *Кукуджанов К.В.* О залечивании поврежденности металла высокоэнергетическим импульсным электромагнитным полем // Вестник ПНИПУ. Механика. 2017. № 2. С. 99–124. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.2.06
5. *Kukudzhanov K.V., Levitin A.L.* Phase Transformations in Metals Stimulated by a Pulsed High-Energy Electromagnetic Field // Procedia IUTAM. 2017. V. 23. P. 84–100. DOI: 10.1016/j.piutam.2017.06.008

УДК 531.36; 62-50

Управление платформой с осцилляторами в условиях неопределенности

И.М. Ананьевский[1,2], Т.А. Ишханян[1,2,3]

[1]Институт проблем механики им. А.Ю. Ашлинского РАН
[2]Московский физико-технический институт (государственный институт)
[3]Институт физических исследований НАН РА

Рассматривается задача локального управления системой, представляющей собой тележку с несколькими прикрепленными к ней линейными осцилляторами. Тележка движется по горизонтальной прямой под действием управляющей силы и неизвестного возмущения. Предполагается, что фазовые состояния осцилляторов не доступны измерениям. Предложен закон ограниченного управления в форме обратной связи, который за конечное время приводит тележку из окрестности терминального положения в это положение.

Рассмотрим движущуюся по шероховатой горизонтальной прямой тележку массой m_0 с прикрепленными к ней n линейными осцилляторами. Осцилляторы описываются как горизонтально колеблющиеся материальные точки массой m_i, соединенные с тележкой с помощью пружин жесткости c_i, $i = 1, 2, ..., n$. На тележку действуют управляющая сила u и неизвестное возмущение v.

Уравнения движения системы имеют вид

$$\begin{aligned} &m_0 \ddot{x} = u + v + \sum_{i=1}^{3} c_i y_i, \\ &m_i\left(\ddot{x} + \ddot{y}_i\right) = -c_i y_i. \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь переменная x описывает текущее положение тележки на прямой, y_i – удлинение пружины i-го осциллятора, $i = 1, 2, ..., n$. Массы осцилляторов и коэффициенты жесткости их пружин считаются неизвестными, а фазовые координаты и скорости $(y_i, \dot{y}_i)$ не доступны измерениям. Возмущения v также считаются неизвестными и удовлетворяют условиям

$$|v(t)| \le V_0, \quad V_0 > 0.$$

Требуется построить управление в форме обратной связи, то есть как функцию переменных $(x, \dot{x})$, удовлетворяющее ограничению

$$|u(x, \dot{x})| \le U_0, \quad U_0 > 0,$$

которое остановит тележку в начале координат за конечное время. Состояние осцилляторов в момент прихода несущего тела в терминальное положение не имеет значения.

Будем считать, что ресурсы управления велики по сравнению с возмущениями, что начальная энергия осцилляторов достаточно мала, и что тележка в начальный момент времени находится достаточно близко от терминального положения.

Для решения сформулированной задачи используем подход, предложенный в [1, 2]. Положим

$$u(x, \dot{x}) = -\frac{6m_0}{T^2(x, \dot{x})} x - \frac{3m_0}{T(x, \dot{x})} \dot{x}. \tag{2}$$

Здесь функция $T(x, \dot{x})$ задается неявно уравнением

$$T^4 - 54\dot{x}^2 T^2 - 216\, x \dot{x} T - 324\, x^2 = 0. \tag{3}$$

В [1] установлено, что уравнение (3) относительно T имеет единственное положительное решение во всем фазовом пространстве $(x,\dot{x})$ кроме нуля, причем функция $T(x,\dot{x})$ по непрерывности может быть доопределена в нуле $T(0,0)=0$.

Положим

$$f(t,y)=v+\sum_{i=1}^{n}c_i y_i.$$

Наряду с системой (1) рассмотрим уравнение

$$\ddot{x}=u+f, \tag{4}$$

где f трактуется как неопределенное возмущение. В [2] показано, что в отсутствие возмущений, то есть при $f\equiv 0$ производная функции T вдоль решений уравнения (4) с управлением (2) удовлетворяет неравенству

$$\dot{T}<-1,$$

а при выполнении условия

$$|f|\le\left(3-\sqrt{3}\right)U_0\Big/6, \tag{5}$$

неравенству

$$\dot{T}<-\gamma,\quad \gamma>0. \tag{6}$$

Введем в рассмотрение функцию Ляпунова

$$\dot{V}(x,\dot{x},y,\dot{y})=\dot{T}(x,\dot{x})+\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}[c_i y_i^2+m_i(\dot{x}+\dot{y}_i)^2].$$

Эта функция положительно определена, а ее производная в силу уравнения (4) равна

$$\dot{V}=\dot{T}-\dot{x}\sum_{i=1}^{n}c_i y_i.$$

Теорема 1. *Существует такое $V_0>0$, что вдоль траекторий уравнения (1), начинающихся в окрестности G начала координат фазового пространства $(x,\dot{x},y,\dot{y})$, задаваемой соотношением:*

$$V(x,\dot{x},y,\dot{y})\le V_0,$$

выполнено неравенство $\dot{V}<0$.

Из утверждения теоремы 1 следует, что траектории, начинающиеся в области G, не покидают ее.

Теорема 2. *Число V_0 может быть выбрано так, что в области G будет выполнено неравенство (5) и, следовательно, неравенство* (6).

Из неравенства (6) вытекает, что функция $T(x,\dot{x})$ обращается в нуль через конечный промежуток времени. Это означает, что любая траектория уравнения (4) достигает начала координат фазового пространства $(x,\dot{x})$ за конечное время, т. е. тележка остановится в предписанном терминальном состоянии и будет удерживаться там с помощью управления (2).

Литература

1. *Ананьевский И.М., Анохин Н.В., Овсеевич А.И.* Синтез ограниченного управления линейными динамическими системами с помощью общей функции Ляпунова // Докл. АН. 2010. Т. 434, № 3. С. 319–323.
2. *Ovseevich A.* A local feedback control bringing a linear system to equilibrium // J. Optim. Theory Appl. 2015. V. 165, N. 2. P. 532–544.
3. *Ананьевский И.М., Ишханян Т.А.* Управление поворотной платформой на подвижном основании в присутствии возмущений // Известия РАН. Теория и системы управления. 2016. № 3. С. 167–175.

УДК 519.6

Методика генерации двумерных тестовых задач оптимального управления на основе алгоритмов аппроксимации множества достижимости

Т.С. Зароднюк[1], И.С. Гусева[2], Е.А. Финкельштейн[1], А.Ю. Горнов [1]

[1]Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН
[2]Бурятский государственный университет

Проблема пополнения существующих коллекций тестовых задач и создания новых продолжает оставаться актуальной в связи с активной разработкой новых алгоритмов и вычислительных технологий оптимизации. Наибольший интерес представляют невыпуклые задачи, численное решение которых порождает специфические трудности [1]. Тестирование на классах таких моделей, обширное сравнение различных подходов, исследование свойств и поиск алгоритмических параметров необходимы для построения наиболее эффективных модификаций алгоритмов [2].

Авторами разработаны алгоритмы аппроксимации множества достижимости [3], [4], которые могут быть использованы, в частности, для генерации тестовых задач оптимизации управляемых динамических систем с заданными свойствами. Возможная в двумерном случае визуализация множества достижимости позволяет однозначно выявить многоэкстремальность задачи минимизации некоторых терминальных функционалов и задать оптимизируемый критерий для генерации необходимого типа тестовой задачи.

В качестве примера приведем нелинейные системы дифференциальных уравнений, размерность которых ограничивается двумя фазовыми переменными для удобства наглядного представления. Присвоенное задаче мнемоимя носит неформальный характер и дает краткую характеристику прикладной постановке или форме множества.

Пример 1. «Очки». Управляемая динамическая система определена на интервале $t \in [0,5]$ и описывается системой дифференциальных уравнений:

$$x_1 = u + x_2 - \frac{x_2^3}{6} + \frac{x_2^5}{120},$$

$$x_2 = u + \sin x_1,$$

с начальными значениями $x(0) = (0,0)$ и ограничениями на управление $u \in [-1,1]$. Множество достижимости системы имеет вид, показанный на рис. 1.

Очевидно, что задача оптимального управления для этой системы, например, с терминальным функционалом $x_2(5) \to \max$ будет иметь 5 локальных экстремумов (рис. 1).

Пример 2. «Крылья». Рассматривается динамическая система на $t \in [0, \pi]$,

$$x_1 = u + x_1,$$

$$x_2 = \cos |\, x_1 \,|,$$

с заданными значениями фазовых координат в начальный момент времени $x(0) = (0,0)$ и ограничениями на управление $u \in [-1,1]$. Множество достижимости системы показано на рис. 2.

В данном случае для функционала $x_2(\pi) \to \min$ можно ожидать наличие, по меньшей мере, шести локальных экстремумов (рис. 2).

Предложенный подход применен авторами при создании тестовых коллекций невыпуклых задач оптимального управления [2] и при решении ряда прикладных задач из областей динамики полета, космонавигации, робототехники, сейсмологии, экологии, медицины, химии, нанофизики, экономики, географии и других.

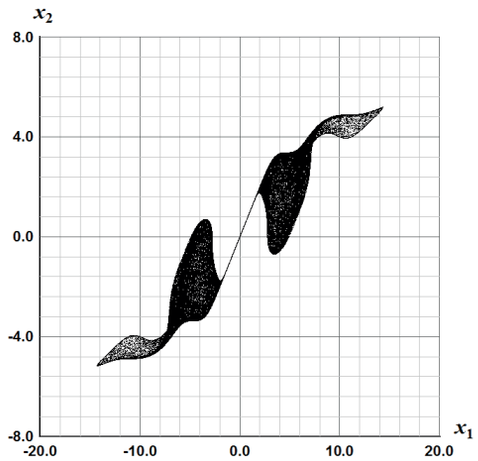


Рис. 1. Множество достижимости в тестовом примере 1

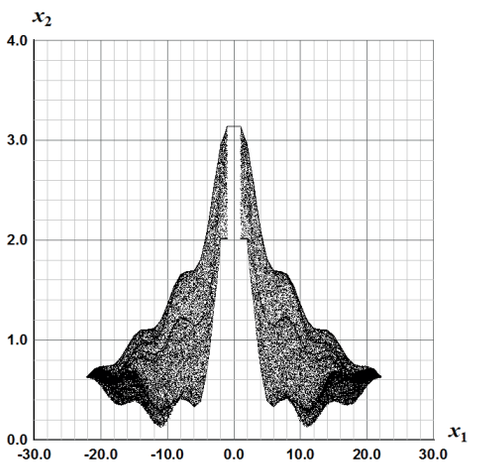


Рис. 2. Множество достижимости в тестовом примере 2

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 17-07-00627.

Литература

1. *Горнов А.Ю.* Классификация проблем, возникающих при численном решении задач оптимального управления // Вычислительные технологии. 2008. Т. 13(1). С. 17–26.
2. *Gornov A.Y., Zarodnyuk T.S., Madzhara T.I., Daneyeva A.V., Veyalko I.A.* A collection of test multiextremal optimal control problems // Optimization, Simulation and Control. Ser. Springer Optimization and Its Applications. 2013. Vol. 76. P. 257–274.
3. *Горнов А.Ю., Финкельштейн Е.А.* Алгоритм кусочно-линейной аппроксимации границы множества достижимости // Автоматика и Телемеханика. 2015. № 3. С. 22–31.
4. *Gornov A.Yu., Zarodnyuk T.S., Finkelshtein E.A., Anikin A.S.* The Method of Uniform Monotonous Approximation of the Reachable Set Border for a Controllable System // J. Glob Optim. 2016. Vol. 66. Issue 1. P. 53–64.

УДК 539.3

Анализ устойчивости квадратных слоистых пластин при неоднородном нагреве

А.В. Шевченко

Институт проблем механики им. А.Ю. Ашлинского РАН

В рамках исследования динамического поведения и устойчивости движущихся упругих материалов (лент, мембран и полотен) была рассмотрена задача о тепловом нагружении двухслойной шарнирно опертой квадратной пластины. Подобные исследования были начаты давно и широко представлены в научной литературе [1–4]. В настоящее время важное место в подобных задачах занимает не только учет механических факторов, таких как скорость движения, сила натяжения, упругие свойства материала, но и учет тепловых воздействий, также оказывающих существенное воздействие на поведение исследуемой модели.

Исследуется процесс прямолинейного движения термоупругого полотна, опертого на систему шарнирных подкреплений и моделируемого двухслойной термоупругой пластиной, которая движется с постоянной скоростью и подвержена нагреву и внешним механическим воздействиям.

Малые поперечные упругие перемещения $w(x,y)$ движущейся вдоль оси Ox с постоянной скоростью V_0 пластины (стационарный случай) описываются дифференциальным уравнением в частных производных четвертого порядка, содержащим члены, обусловленные действием внутриплоскостного натяжения T_0 и центростремительных сил, а также члены, учитывающие термомеханические воздействия [3, 4]:

$$(mV_0^2 - T_0)\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + D\Delta^2 w + \frac{Eh}{1-\nu}\varepsilon_\theta + (1+\nu)D\Delta\kappa_\theta = 0, \qquad (1)$$

где h – толщина пластины, $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ – цилиндрическая жесткость, E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона, Δ и Δ^2 – гармонический и бигармонический операторы.

Пластина считается шарнирно опертой по краям $x = 0$ и $x = l$, а края $y = \pm b$ считаются свободными от нагрузок, что описывается следующими граничными условиями:

$$w = 0, \qquad \frac{\partial w}{\partial x} = 0, \qquad x = 0, x = l,$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + (1+\nu)\kappa_\theta = 0, \; y = \pm b, \qquad (2)$$

$$(2-\nu)\frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y} + \frac{\partial^3 w}{\partial y^3} + (1+\nu)\frac{\partial \kappa_\theta}{\partial y} = 0, \qquad y = \pm b.$$

Внутриплоскостная и изгибная термические деформации определяются как [4]

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{h}\int_{-h/2}^{h/2} \alpha_\theta \theta dz, \quad \kappa_\theta = \frac{12}{h^3}\int_{-h/2}^{h/2} \alpha_\theta \theta z dz. \qquad (3)$$

В случае однородной внутриплоскостной термической деформации ($\kappa_\theta = 0$) для изотропной пластины исследование устойчивости сводится к решению задачи на собственные значения для следующего уравнения в частных производных:

$$(mV_0^2 - T_0)\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + D\Delta^2 w + \frac{Eh}{1-\nu}\varepsilon_\theta \Delta w = 0. \qquad (4)$$

Для исследования влияния на полотно, моделируемое термоупругой пластиной, тепловых воздействий, которые могут вызвать потерю устойчивости, рассмотрим случай, когда $V_0 = 0$, а температура меняется линейно вдоль оси Ox (случай 1) или меняется

линейно по толщине (случай 2). Исследования напряженно-деформированного состояния и устойчивости пластины проводилось численно с помощью метода конечных элементов.

Для исследования напряженно-деформированного состояния слоистой шарнирно опертой пластины из разнородных материалов также был проведен конечно-элементный расчет Nastran в линейной постановке с использованием трехмерных элементов. Некоторые результаты статического анализа устойчивости представлены на рис. 1, 2.

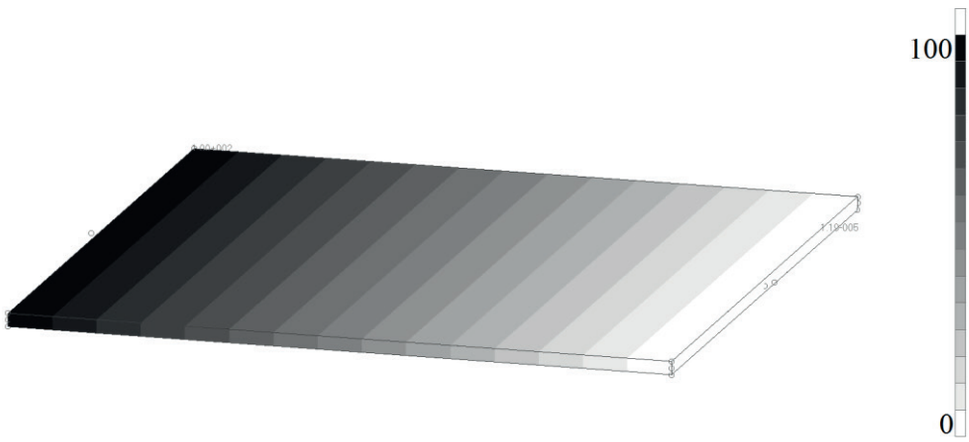


Рис. 1. Распределение температуры вдоль оси *Ox*

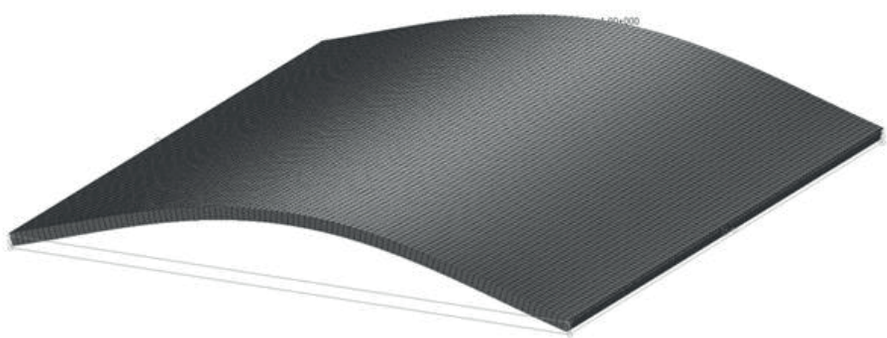


Рис. 2. Потеря устойчивости, мода 1, $\lambda = 1.4021$

Работа выполнена за счет гранта РНФ (проект №17-19-01247).

Литература

1. *Баничук Н.В., Иванова С.Ю.* О продольном движении панели при механических и температурных воздействиях. // Проблемы прочности и пластичности. 2016. Т. 78, № 2. С. 123–130.
2. *Banichuk N.,Ivanova S., Jeronen J., Makeev E., Neittaamäki P., Tuovinen T.* A. Thermoelastic Instability Problem for Axially Moving Plates. // Reports of the Department of Mathematical Information Technology. Series B: Scientific Computing No B. 3/2016, University of Jyvaskyla, 11 p.
3. *Тимошенко С.П.*, *Войновский-Кригер С.* Пластинки и оболочки. М.: Наука, 1966. 636 с.
4. *Коваленко А.Д.* Термоупругость. Киев: Издательское объединение «Вища Школа», 1975. 216 с.

УДК 531.2

Построение модели термомеханического актюатора для шагающего робота

А.М. Нунупаров

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Термомеханический актюатор представляет собой кремниевое основание с V-образными выемками, в которые заливается полиимид. При остывании полиимида он сокращается в размерах, изгибая актюатор в сторону основания (рис. 1a). С обратной стороны актюатора наносятся металлические проводники таким образом, что при прохождении тока через проводники полиимид, находящийся в выемках, нагревается, что приводит к изгибу актюатора в другом направлении. Такой актюатор может быть использован в качестве движителя для шагающего робота. Концепция такого робота рассмотрена в [1]. Силы и моменты, действующие на ногу робота, проанализированы в статье [2]. Механическая модель V-образных выемок, в которые заливается полиимид, была получена в статье [3].

В данной работе рассмотрена задача построения математической модели термомеханического актюатора по экспериментальным данным. Актюатор моделировался плоским шарнирным многозвенником, звенья которого имеют одинаковые геометрические и инерционные параметры. В шарнирах расположены упругие элементы, создающие моменты сил, пропорциональные изменению углов между звеньями по отношению к значениям этих углов в недеформированной конфигурации. В недеформированной конфигурации многозвенник имеет форму правильной ломаной. Такая модель представляется близкой к реальной структуре актюатора. Абсолютно твердые компоненты многозвенника соответствуют частям актюатора, состоящим из кремния, а шарниры соответствуют сгибающимся частям актюатора, содержащим полиимид.

Модель схематично изображена на рис. 2b, где $L-$ длина актюатора, $l-$ длина одного звена, ϕ_i – угол между звеньями i-1 и i, $F-$ сосредоточенная сила, приложенная к концу актюатора, $\beta-$ угол между горизонтальной плоскостью и направлением силы. Предполагается, что шарниры имеют одинаковую крутильную жесткость c, через ϕ_0 обозначен угол между соседними звеньями при ненагруженном конце актюатора, через α обозначена сумма $\sum_i^n \phi_i$. Выберем в качестве обобщённых координат углы ϕ_i, тогда условия равновесия рассматриваемого многозвенника, нагруженного силой F, можно привести к следующему виду:

$$Fl\cos\beta\left[\sum_{j=i}^{n}\sin\left(\sum_{k=1}^{j}\varphi_k\right)\right]+Fl\sin\beta\left[\sum_{j=i}^{n}\cos\left(\sum_{k=1}^{j}\varphi_k\right)\right]+ \tag{1}$$
$$+C(\varphi_i-\varphi_0)=0,\quad i=1,\ldots,n.$$

Экспериментальные данные были представлены в виде различных сочетаний значений углов α,β, ϕ_0 и силы F. Длина актюатора была фиксирована: $L=1.29\,см$. Исходя из этих данных и уравнений (1) был восстановлен коэффициент c при указанных выше параметрах. Коэффициент жесткости c был подобран так, чтобы минимизировать следующую сумму квадратов:

$$\Psi=\sum_k\left(\alpha_k-\sum_i\phi_i^{c_k}\right)^2,$$

где k соответствует индексу набора экспериментальных данных, а $\phi_i^{c_k}$ является решение системы уравнений (1) при пробном параметре c_k. В результате минимизации

этой суммы квадратов было найдено значение крутильной жесткости шарниров $c = 0.5\,\text{Нм}/\text{рад}$ из части экспериментальных данных.

На оставшейся части экспериментальных данных выведена формула для расчета упругого момента в шарнире с учетом вычисленной ранее крутильной жесткости. Были вычислены углы $\alpha^k = \sum_i \phi_i^k$ из системы уравнений (1) с учетом вычисленной ранее жесткости каждого шарнира $c = 0.50\,\text{Нм}/\text{рад}$. Далее методом наименьших квадратов восстановлена линейная зависимость $\alpha(F)$:

$$\alpha = 63.85 - 0.2F.$$

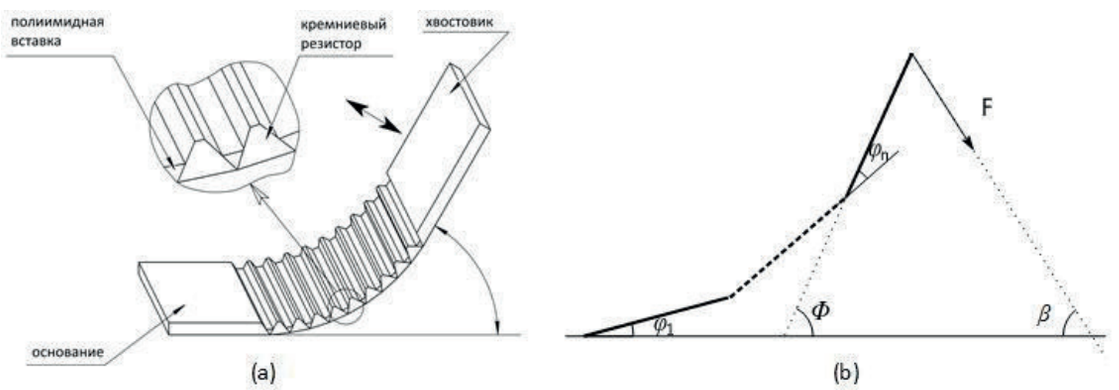


Рис. 1. a – термомеханический актюатор; b – схема шарнирного многозвенника

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-00949).

Литература

1. *Bolotnik N. N., Gradetsky V. G., Zhukov A. A., Kozlov D. V., Smirnov I. P. and Chashchukhin V. G.*. Mobile microrobotics for space exploration: the state-of-the-art and prospects // Advances in Cooperative Robotics. Proc. of the 19th Int. Conf. of Climbing and Walking Robots (CLAWAR). 2016. P. 739–746.
2. *Bolotnik N. N., Chashchukhin V. G., Gradetsky V. G., Kozlov D. V., Smirnov I. P., Sukhanov A.N. and Zhukov A. A.*. Design of mobile microrobots with thermomechanical actuators // Proceed. of 12th Intern. Conf. on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO). 2015. V.2, P. 252–258.
3. *Bogoslavsky I.V, Bolotnik N.N., Chashchukhin V.G,, Gradetsky V.G., Nunuparov A.M., Kozlov D.V., Smirnov I.P., Zhukov A.A.* Static modelling of a thermomechanical actuator for a walking microrobot // Proc. of the 20th Int. Conf. of Climbing and Walking Robots (CLAWAR). 2017. P. 449–456.

УДК 539.319

Структурная оптимизация многослойных гиперупругих цилиндров

С.А. Лычёв[1], Г.В. Костин[1], К.Г. Койфман[2]

[1]Институт проблем механики им. А.Ю. Ашлинского РАН
[2]Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

В работе исследуется эволюция напряженно-деформированного состояния структурно неоднородного цилиндра при конечных деформациях и решается модельная задача оптимизации его структуры. Подобные задачи возникают при математическом моделировании физико-механических свойств тел, получаемых в ходе аддитивных технологических процессов, а также при выборе наилучшей технологической стратегии их изготовления. Несколько слов об актуальности исследования. Аддитивные технологии, основанные на процессах лазерной селективной наплавки или спекания, химического и

физического многофазного осаждения, электрокристаллизации и пр., интенсивно развиваются и внедряются в различные отрасли машиностроения, авиа- и космической индустрии [1]. Столь пристальное внимание к аддитивным технологиям обусловлено, в частности, возможностью изготовления деталей сложной формы почти без ограничений на ее геометрические свойства, присущие, как правило, традиционным технологиям обработки. Вместе с тем сам принцип аддитивной технологии, т.е. создания детали из мельчайших частиц путем их последовательного соединения (спекания, склеивания и т.п.), неизбежно приводит к появлению самоуравновешенных собственных (остаточных) напряжений, которые не могут быть обращены в нуль никакой гладкой деформацией детали в целом. Поскольку, как правило, собственные напряжения распределены неоднородно по объему детали, то они приводят: 1) к неоднородности физико-механических свойств (определяемых модулем Юнга, коэффициентом Пуассона, коэффициентом оптического преломления и т.д.); 2) к снижению прочностных характеристик изделия; 3) к искажению формы детали. Последние два фактора нежелательны, и с ними следует бороться. При расчетах и проектировании их влияние должно быть минимизировано. Первый фактор может в определенных случаях быть использован конструктивно, например, можно изготавливать детали с заданным распределением полей остаточных напряжений, которое приведет к наилучшему (оптимальному по выбранному критерию) поведению детали в условиях эксплуатационного нагружения. Возможность управления технологическим процессом позволяет создать такие предписанные поля. Это приводит к разнообразным постановкам задач структурной оптимизации и управления [2].

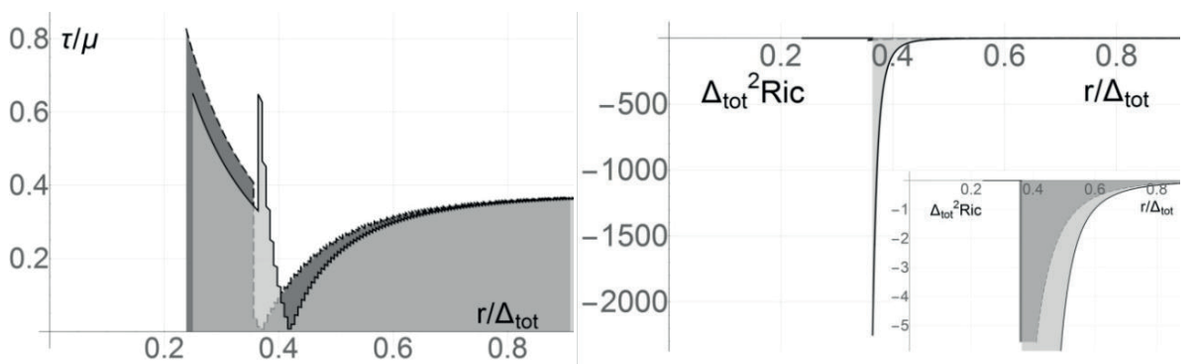
В работе решается модельная задача структурной оптимизации полого конечного цилиндра из несжимаемого гиперупругого материала, структурно неоднородного вдоль радиуса основания. Условия на основаниях, соответствующие скользящему контакту, позволяют воспользоваться универсальными решениями Ривлина–Эриксена, которые записываются в аналитическом виде [3, 4]. Благодаря этому удается существенно упростить вычисления и получить иллюстрации физических эффектов с помощью относительно простых расчетов.

Рассматриваются дискретная и непрерывная структурные неоднородности. В первом случае структурно неоднородное тело представлено совокупностью конечного числа коаксиальных полых цилиндров, попарно соприкасающихся по боковым (цилиндрическим) участкам границ, на которых предполагается выполнение условий идеального контакта. Управление задается давлением на внутренней границе цилиндрической подложки (первый слой). Эта задача решается методами классической нелинейной теории упругости. Второй случай более деликатный. Непрерывность структурной неоднородности предполагает, что цилиндрический слой, представляющий некоторые фиксированные характеристики, вырождается в цилиндрическую поверхность. В этом случае тело представляется как континуальная последовательность тел, каждое из которых не обладает свободной от напряжений формой. Однако поскольку материал предполагается простым, то для их описания может быть применена идеология «неевклидовых тел» или тел с распределенными дефектами, в рамках которой отсчетная ненапряженная форма все же может быть построена, но не в евклидовом пространстве, а в пространстве с особой - материальной связностью [5]. Как и в дискретном случае, управление задается давлением на внутренней поверхности подложки.

В расчетах минимизировалось максимальное значение интенсивности напряжений Коши, вычисляемое по всему объему структурно неоднородного тела. Поиск локального минимума осуществлялся методом наискорейшего спуска [6]. Значение функции цели вычислялось в дискретном случае из системы нелинейных дифференциальных уравнений, решения которых (универсальные решения) определялись в аналитическом виде, и вычисления фактически сводились к многократному численному решению трансцендентного уравнения. В непрерывном случае значение функции цели определялось численно как решение нелинейного интегрального уравнения. Результаты поиска локального минимума, соответствующие сборке из 100 слоев, показаны на рис. 1 (а). Штриховая линия с темным фоном иллюстрирует распределение интенсивности для

нулевых давлений на внутренней границе подложки, тогда как сплошная линия со светлым фоном соответствует локально оптимальным значениям давления. Распределения инварианта Риччи [7], соответствующие тензору кривизны материальной связности для непрерывного случая, показаны на рис. 1 (b). При вычислениях использовались следующие физико-геометрические характеристики. Внутренний отсчетный радиус подложки полагался равным 3 мкм, а его отсчетная толщина – 1 мкм. Отсчетные радиусы остальных слоев полагались равными $6/(N-1)$, где N – число слоев. Коэффициент усадки полагался равным 0.9. Внешние гидростатические нагрузки полагались нулевыми. Материальная постоянная [3] $\beta = 0.241$.

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что качество изучаемой многослойной структуры может быть улучшено по меньшей мере на 25% посредством контроля деформации подложки в ходе изготовления.



(a) (b)

Рис. 1. Относительная интенсивность напряжений (a) и относительный инвариант Риччи (b). Здесь μ – модуль сдвига, r – радиальная координата, Δ_{tot} – суммарная толщина сборки

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (№ 15-08-06330, № 16-58-52033)

Литература

1. Multilayer thin films / Ed. by *Gero Decher, Joe B. Schlenoff.* Weinheim: Wiley-VCH-Verlag GmbH, 2012. 1112 p.
2. *Sigmund, O., Maute, K.* Topology optimization approaches: A comparative review // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2013. V. 48, N 6. P. 1031–1055.
3. *Truesdell C., Noll W.* The non-linear field theories of mechanics. Berlin: Springer-Verlag. 2004. 627 p.
4. Лычев С.А. Универсальные деформации растущих тел // Изв. РАН. МТТ. 2011. № 6. С. 63–79.
5. *Lychev S., Koifman K.* Geometric aspects of the theory of incompatible deformations. Part I. Uniform configurations // Nanomechanics Science and Technology: An International Journal. 2016. V. 7, N 3. P. 177–233.
6. *Dennis Jr., J.E., Schnabel, R.B.* Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations. Series: Classics in Applied Mathematics. Philadelphia: SIAM, 1996. 395 p.
7. *Petersen P.* Riemannian Geometry. Berlin: Springer-Verlag, 2006. 411 p.

УДК 533.1

Диссоциация воздуха за гиперзвуковой ударной волной

И.А. Чепрасов, В.П. Коновалов

Московский физико-технический институт (государственный университет)

В работе исследуется равновесная диссоциация молекул азота N_2 и кислорода O_2 в воздухе за гиперзвуковой ударной волной: $N_2 \leftrightarrow N + N$, $O_2 \leftrightarrow O + O$ в диапазоне температур $500–5000$ К и при давлениях порядка $1–0.03$ атм. Подобные условия характерны для пограничного слоя, образующегося на поверхности метеорита или летательного аппарата при вхождении в плотные слои атмосферы Земли [1]. Изменение концентраций компонент газа описывается системой уравнений законов действующих масс для равновесной диссоциации, уравнения состояния с учетом состава атмосферы [2]:

$$\frac{[N][N]}{[N_2]} = R_N(P,T), \quad (1)$$

$$\frac{[O][O]}{[O_2]} = R_O(P,T), \quad (2)$$

$$P = ([N] + [N_2] + [O] + [O_2])T, \quad (3)$$

$$\frac{2[N_2]+[N]}{2[O_2]+[O]} = \frac{0.78}{0.22}, \quad (4)$$

здесь $[N_2]$, $[N]$, $[O_2]$, $[O]$ – концентрации молекул и атомов азота и кислорода соответственно, $R_N(P,T)$, $R_O(P,T)$ – коэффициенты скорости равновесной диссоциации, определяемые структурой конкретных молекул [3] и параметрически зависящие от давления P и температуры T в атмосфере.

Система трансцендентных уравнений (1)–(4) решалась численно методом итераций. Результат представляется в виде зависимости степени диссоциации α (доля распавшихся молекул) от температуры при различных возможных давлениях. Молекулярный кислород диссоциирует скорее молекулярного азота поскольку имеет меньший потенциал диссоциации. Степень диссоциации кислорода в воздухе представлена на рис. 1. Диссоциация составляющих молекул воздуха способна существенно влиять на транспортные свойства многокомпонентного газа (теплопроводность, диффузия, вязкость), что важно для проблем теплозащиты летательного аппарата.

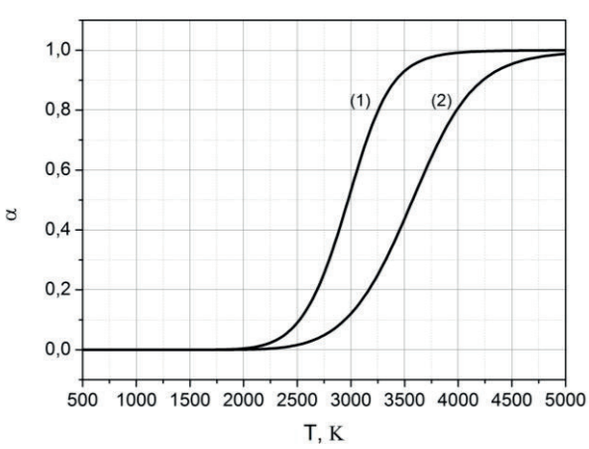


Рис. 1. Зависимость степени диссоциации кислорода α от температуры T при различных давлениях: (1) – 0,03 атм, (2) – 1 атм

Литература

1. *Дегтярь В.Г., Сон Э.Е.* Гиперзвуковые летательные аппараты. Т. 1. М.: Янус-К, 2016. 150 с.
2. Стандартная модель атмосферы Земли. URL: http://files.school-collection.edu.ru/dlrstore/540b006e-c9e3-3851-261c-2fccdd5568a7/1011820A.htm
3. *А.А. Радциг, Б.М. Смирнов*. Справочник по атомной и молекулярной физике. М.: Атомиздат, 1980. 240с.

УДК 533.73

Моделирование технологии получения чистого алюминия

В.С. Морозов, Э.Е. Сон

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Данная работа посвящена исследованию получения оксида алюминия высокой чистоты для высококачественной оптической керамики, монокристаллического алюмоиттриевого граната и лейкосапфира. Последний применяется для производства светодиодов, подложек микросхем, лазерных диодов, имплантов и искусственных суставов, микроскальпелей, защитных стекол и во многих других сферах.

Ранее в работах [1–2] была экспериментально продемонстрирована возможность получения оксида алюминия чистотой 99.997% из алюминиевого порошка чистотой 99.8% путем подбора условий эксперимента с учетом простых аналитических оценок скорости диффузии примеси в плотной частице оксида алюминия и скорости испарения примеси с поверхности этой частицы.

В данной работе предложена математическая модель, описывающая выход примеси в газовой фазе из слоя порошка, состоящего из пористых гранул. Модель включает в себя диффузию примеси в плотной микрочастице, испарение примеси с ее поверхности и выход пара примеси сначала через поры между микрочастицами гранулы, а затем через поры между гранулами на поверхность слоя порошка.

Выход примеси из слоя гранулированного оксида алюминия может быть смоделирован в одномерном приближении для каждого из перечисленных ниже трех этапов удаления примеси из образца.

1. Движение атома примеси по радиусу r монокристаллической микрочастицы до внешнего радиуса частицы a0 и последующая сублимация примеси с поверхности микрочастицы.

2. Движение примеси в газовой фазе по радиусу r пористой сферической гранулы из сплошных микрочастиц до внешнего радиуса частицы a.

3. Движение примеси в газовой фазе по оси z образца, представляющего собой цилиндр сферических гранул высотой H и радиусом a.

Для решения поставленной задачи были получены решения уравнений неоднородной диффузии в сфере большого радиуса и диффузии в объемном цилиндре.

Задачу о диффузии в сфере можно решить в более общей постановке, учитывая азимутальную неоднородность u(t, r, θ,) , тогда уравнение диффузии будет иметь вид

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{D}{r^2}\frac{\partial}{\partial r} r^2 \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{D}{r^2 \sin\theta}\frac{\partial}{\partial \theta}\sin\theta \frac{\partial u}{\partial \theta}, \quad (1)$$

где D – коэфициент диффузии железа в алюминии. Общее решение дается формулой:

$$u(r,\theta,t) = \frac{1}{r}\sum_{r=1}^{\infty} C_n P_n(\cos\theta) I_{n+1/2}(k_n a) e^{-D k_n^2 t}. \quad (2)$$

Постоянные $\{C_n\}$ определяются разложением начального распределения по функциям Бесселя и сферическим функциям.

Рассмотрим диффузию в цилиндре с высотой H и радиусом R, заполненном микросферами с размерами много меньше его размеров, в котором микросферы генерируют примеси железа вследствие тепловой эмиссии.

Область решения задачи: $0 \le z \le H$, $0 \le r \le a$, уравнение диффузии для концентрации примеси $u(t, r, z)$ имеет вид

$$\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{t}} = \frac{\mathrm{D}}{\mathrm{r}} \frac{\partial}{\partial \mathrm{r}} \mathrm{r} \frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{r}} + \mathrm{D} \frac{\partial^2 \mathrm{u}}{\partial \mathrm{z}^2}. \quad (3)$$

Начальное условие для концентрации

$$u(t = 0, r, z) = \mathrm{u}_0(r, z). \quad (4)$$

В качестве граничных условий на цилиндрической поверхности будем для простоты всюду рассматривать условие сопряженного массобмена на границе цилиндра:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial r} + hu\right)_{r=a} = 0 \quad (5)$$

и конечность концентрации на оси

$$u(t, r = 0, z) \le \infty. \quad (6)$$

Для граничных условий по вертикальной оси z примем нулевой поток при $z = 0$ и условия сопряженного массобмена на верхней границе при $z = H$, определяемый температурой верхней поверхности цилиндра:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial z} + hu\right)_{r=H} = 0, \quad (7)$$

Обозначим

$$\frac{1}{T}\frac{dT}{dt} = -\gamma, \quad (8)$$

$$k = \sqrt{\gamma / D}, \quad (9)$$

$$j_H = -D \left.\frac{dZ}{dz}\right|_{z=0}, \quad (10)$$

$$\lambda^2 = m^2 + \gamma / D. \quad (11)$$

Общее решение дается суперпозицией решений

$$n(t, r, z) = T_0 \frac{j_H H}{k\, sh(k)}\, ch\, \frac{kz}{H} \sum_{m=1}^{\infty} A_m\, I_0(\lambda_m r) e^{-\gamma_m t}, \quad (12)$$

где коэффициенты $\{A_m\}$ определяются разложением начального профиля концентрации по функциям Бесселя.

Литература

1. *Vlaskin M.S., Grigorenko A.V., Zhuk A.Z., Lisitsyn A.V., Sheindlin A.E., Shkol'nikov E.I.* Synthesis of high-purity α-Al_2O_3 from boehmite obtained by hydrothermal oxidation of aluminum // High Temperature. 2016. V. 54. N 3. P. 322–329.
2. *Zhuk A.Z., Vlaskin M.S., Grigorenko A.V., Kislenko S.A., Shkolnikov E.I.* Synthesis of highpurity α-Al_2O_3 from boehmite by high temperature vacuum treatment // Journal of Ceramic Processing Research. 2016. V. 17. N 9. P. 910–918.

УДК 533.922

Влияние поверхностных и объёмных пузырьков на развитие электрического разряда в воде

В.А. Панов[1,2], Л.М. Василяк[2], С.П. Ветчинин[2], В.Я. Печеркин[2]

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2]Объединённый институт высоких температур РАН

Механизмы инициации и развития импульсного электрического разряда в воде определяются не только параметрами импульса напряжения (т.е. скоростью нарастания и амплитудой), но и в первую очередь проводимостью воды. До недавнего времени основным механизмом развития считался быстрый «стримерно-лидерный» механизм, для которого характерны скорости распространения разрядного канала порядка км/с. В [1] было показано, что при повышенной проводимости воды разряд может развиваться по тепловому механизму со скоростями канала на уровне единиц и десятков м/с. При этом ток, протекающий до начала ионизационных процессов, обусловлен собственной проводимостью жидкости, а время зажигания разряда определяется формированием парогазовой области вблизи анода и её пробоем. В [2] теоретически получена величина критического поля частичного разряда в пузырьке газа, помещенного в непроводящую жидкость, и проведено моделирование [3].

Целью данной работы является исследование влияния предварительно созданных на поверхности электродов и в объёме проводящей жидкости паровоздушных пузырьков на характерные времена зажигания разряда и механизм его развития.

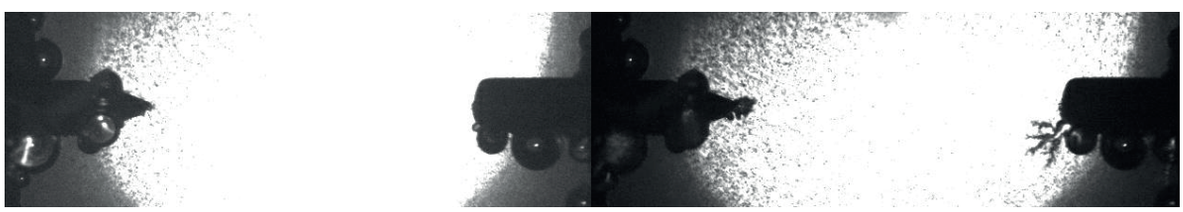
Для получения паровоздушных пузырьков в объёме воды использовался метод декомпрессии, в котором предварительно растворенный в воде под давлением воздух формирует микропузырьки при последующем резком сбросе давления. Средний диаметр пузырьков $d_{10} = (40 \pm 10)$ мкм.

Исследования проводились при напряжениях, близких к минимальному пробойному для воды без пузырьков $U_m \approx 9$ кВ и при перенапряжении до 1.5. На рис. 1 представлены теневые фотографии развития разряда в водопроводной воде с микропузырьками в объеме и «чистыми» электродами при перенапряжении 1.5. В указанном диапазоне напряжений механизм пробоя и развития разряда не отличался от наблюдаемого ранее в водных растворах той же проводимости [1], т.е. реализовался тепловой механизм пробоя. Время роста начальной парогазовой области до критического размера, при котором происходит её пробой, составило ~ 40 мкс. Время распространения канала разряда из начальной области составило ~ 1.2 мс, что совпадает с полученными нами ранее результатами. Средняя скорость канала составила ~ 8 м/с. Энергия, вложенная к моменту инициации разряда, составила 1.5 Дж, к моменту замыкания промежутка каналом разряда – 30 Дж.

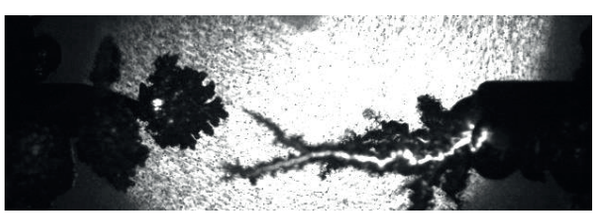
Было обнаружено, что на инициацию и развитие пробоя в проводящей воде в большей степени влияют пузырьки на поверхности электродов (рис. 2). В изначально покоящихся до подачи напряжения пузырьках в течение первых 8 мкс происходит пробой (рис. 2а, яркие точки в центрах крупных катодных пузырьков – изображения источника подсветки). При этом пробой анодных пузырьков выглядит как возникновение светящейся «перемычки» между поверхностями электрода и пузырька, проходящей практически по диаметру, а в катодных пузырьках возникает, скорее, равномерная засветка. В последующие ~10 мкс в отдельных пузырьках равномерная засветка также трансформируется в «перемычку» (рис. 2б).

а) до подачи напряжения б) 315 мкс

Рис. 1. Развитие ЭР в водопроводной воде с микропузырьками при перенапряжении 1.5. Анод – слева, катод – справа. Равномерная зернистость на светлом фоне между электродами – распределенные микропузырьки



а) 7 мкс б) 20 мкс



в) 138 мкс

Рис. 2. Развитие электрического разряда в водопроводной воде с микропузырьками и пузырьками на поверхности обоих электродов, перенапряжение 1.5. Яркость изображений а) увеличена относительно б) искусственно (в стандартной программе управления фотокамерой Phantom Camera Control Software, версия 2.7) с целью сделать видимыми процессы в поверхностных пузырьках, обладающих слабым собственным свечением

Литература

1. *Panov V.A., Vasilyak L.M., Vetchinin S.P., Pecherkin V.Ya. and. Son E.E.* Pulsed electrical discharge in conductive solution // J. Phys. D: Appl. Phys. 2016. Vl. 49. N. 38. P. 385202.
2. *Ушаков В.Я.* [*и др.*]. Пробой жидкостей при импульсном напряжении. Томск: Изд-во НТЛ, 2005. 488.
3. *Babaeva N. Y., Tereshonok D. V., Naidis G. V.* Initiation of breakdown in bubbles immersed in liquids: pre-existed charges versus bubble size // J. Phys. D: Appl. Phys. 2015. Vl. 48. N. 35. P. 355201.

УДК 629.786.2.015.4

Исследование динамических характеристик типовой ступени РН с учетом гидроупругих свойств топливных баков

А.Ю. Бондаренко, З.М. Курашов

Московский физико-технический институт (государственный университет)
Центральный научно-исследовательский институт машиностроения

Рассмотрены основные подходы к определению динамических характеристик топливных баков ракет-носителей при различных заправках с использованием метода конечных элементов. Показано, что при решении задачи об определении гидроупругих тонов колебаний баков наиболее предпочтительным является использование метода виртуальных масс. В работе рассматриваются теоретические основы этого метода, а также его программная реализация.

Проведено исследование зависимости времени расчета и сходимости решения от числа смоченных элементов при расчете продольных гидроупругих тонов с использованием метода виртуальных масс. Был проведен расчет первого и второго продольных гидроупругих тонов колебаний жидкости в типовом баке РН при трех различных заправках. Показано, что время расчета пропорционально кубу от числа смоченных элементов. Также получено, что удовлетворительной сходимости результатов при небольшом времени расчета можно достичь, если число смоченных элементов в модели не превышает 3000.

Проведен расчет динамических характеристик баков окислителя и горючего типовой ступени РН с учетом поведения жидкости в баках. Определены частоты и эффективные массы первых продольных гидроупругих тонов колебаний баков при различных заправках топливом. Результаты расчетов показывают, что эти частоты на всем участке полета III ступени отличаются не более чем на 8 Гц, что является поводом для более детального анализа поведения конструкции ступени на этапе выведения.

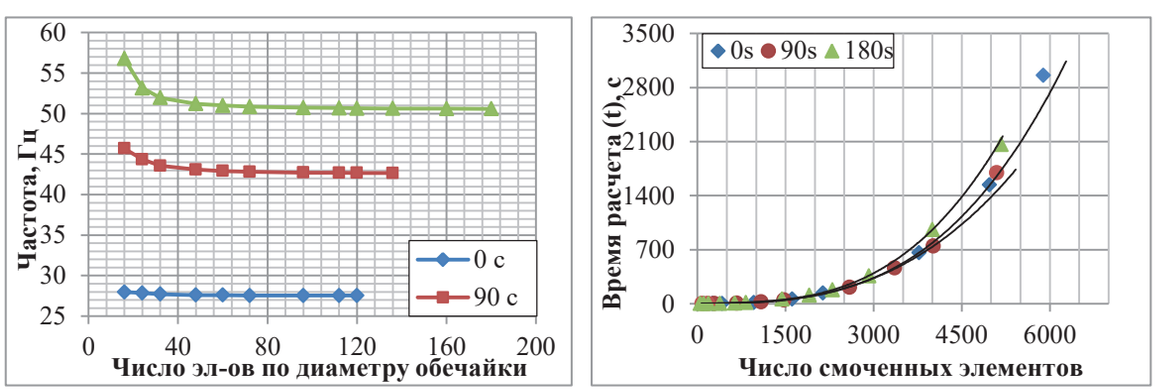


Рис. 1. Сходимость решения (слева) и длительность расчета (справа) при различных заправках и степенях дискретизации типового бака

Литература

1. *Кармишин А.В., Лиходед А.И., Паничкин Н.Г., Сухинин С.Н.* Основы отработки прочности ракетно-космических конструкций. М.: Машиностроение, 2007.
2. *Зенкевич О., Морган К.* Конечные элементы и аппроксимация пер. с англ. М.: Мир, 1986.
3. MD NASTRAN. User's guide. 2005, MSC.Software Corp.
4. *Бабаков И.М.* Теория колебаний. М.: Наука, 1968.

УДК 681.2.089

Проверка согласования строительных осей датчиков магнитометра научной аппаратуры «МАГКОМ»

Т.А. Ивашова, Е.С. Хнырева

Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева

При реализации проекта космического аппарата «АИСТ» важной задачей являлось исследование его вращательного движения вокруг центра масс [1]. Для выполнения этой задачи была разработана научная аппаратура «МАГКОМ» [2]. В её состав входили два трёхкомпонентных датчика магнитометра. Компоненты вектора угловой скорости вращательного движения космического аппарата вокруг центра масс оценивались по измерениям магнитного поля Земли [3].

Для корректной оценки параметров вращательного движения космического аппарата необходимо проверить и доказать согласованность строительных осей двух датчиков магнитометра. Решению этой задачи и посвящена данная работа.

Для достижения поставленной цели был проведён статистический анализ данных измерений, выполненных на лётном образце космического аппарата «АИСТ» (рис. 1) в период с 27.04.2013 г. по 16.05.2013 г. В результате этого анализа было доказано соответствие строительных осей датчиков магнитометра X_1—$У_2$, X_2—$У_1$, Z_1—$(–Z_2)$. При сравнении соответствующих каналов измерений был выявлен значимый сдвиг во всех парах.

Дальнейшее направление исследования могут быть связаны с исследованием выявленного сдвига между каналами измерений. Он не может быть объяснён ни инструментальной погрешностью, ни некорректной работой самих средств измерений.

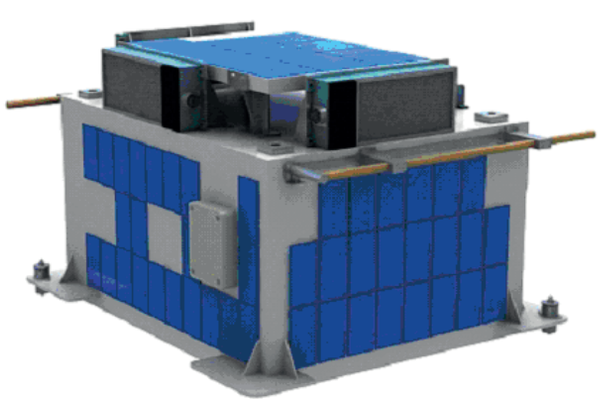


Рис. 1. Общий вид лётного образца МКА «АИСТ»

Литература

1. *Белоусов А.И., Сёмкин Н.Д., Седельников А.В., Пузин Ю.Я., Воронов К.Е., Пияков А.В., Филиппов А.С.* Анализ вращательного движения малых космических аппаратов серии «АИСТ» // Авиакосмическое приборостроение. 2017. № 8. С. 3–10.
2. *Седельников А.В., Филиппов А.С., Горожанкина А.С.* Проблемы обработки данных магнитного поля Земли средствами измерений научной аппаратуры «МАГКОМ» // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2017. № 7. С. 33–40.
3. *Седельников А.В., Молявко Д.П., Хнырева Е.С.* О снижении управляемости космического аппарата при проведении активного контроля микроускорений на стадии эксплуатации // Авиакосмическое приборостроение. 2017. № 4. С. 25–34.

УДК 533.6.078

Расчёт параметров в форкамере аэродинамических установок, использующих в качестве рабочего газа CO_2

Г.Ю. Мухаметдинов

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Разработана методика получения высокотемпературного CO_2 в форкамере на основе комбинации методов изоэнтропического сжатия, наполнения форкамеры с низким давлением рабочим газом при высоком давлении и нагрева смеси за счёт теплового эффекта физико-химической реакции горения CO.

Расчёты проводились при различных давлениях, при котором начиналось истечение в форкамеру с низким давлением, и мольных долях углекислого газа, варьирование которого позволяет получать температуру в форкамере в широких пределах.

Показано, что доминирующим фактором увеличения температуры является тепловой эффект физико-химической реакции.

Максимальные температура и давление, получаемые в условиях ограничения температуры, составляют в случае истечения в вакуумированную форкамеру 2500 К и 1350 атм, в случае истечения в форкамеру с кислородом 2500 К и 3000 атм соответственно.

Таким образом, появляется возможность воспроизведения натурных гиперзвуковых течений.

Литература

1. *Антохин В.М., Жохов В.А*. Явление перегрева газа в импульсной аэродинамической установке. М.: Учёные записки ЦАГИ. Т. XVI, № 2. 1985. С. 41–48.
2. *Щетинков Е.С.* Физика горения газов. М.:Наука, 1965–536 с.
3. *Глушко В.П., Гурвич Л.В., Вейц И.В., Медведев В.А., Хачкурузов Г.А., Юнгман В.С., Бергман Г.А., Байбуз В.Ф., Иориш В.С.* [*и др*.]. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. М.: Наука, 1978. Табл. 5, 248, 250.

УДК 533.924

Гетерогенные процессы на поверхности углерода в потоке азота

Д.Е. Губанов[1,2]

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2]Центральный научно-исследовательский институт машиностроения

Абляционные материалы являются важной частью теплозащиты при высокоскоростных спусках в атмосфере. Корректно поставленные эксперименты, дополненные численными расчётами, помогают при разработке теплозащитных систем. В отличие от реакции оксидации (горения) и сублимации углеродных материалов в воздухе процесс термохимического разрушения углеродных материалов в потоке азота остаётся недостаточно изученным. В данной работе представлено описание и анализ экспериментов по уносу массы углерода в плазменном потоке азота, проведённых на высокочастотном плазматроне У-13ВЧП ФГУП ЦНИИмаш.

Химическая реакция между азотом и углеродом происходит в несколько этапов. Сначала атомы и молекулы азота диффундируют через пограничный слой к поверхности графита и адсорбируются поверхностью. Затем происходит собственно химическая реакция между азотом и углеродом. Следующий этап – десорбция продуктов реакции и, наконец, диффузия этих продуктов через пограничный слой. Скорость реакции определяется скоростью самого медленного из элементарных процессов.

При низких температурах поверхности таким определяющим процессом является химическая реакция между азотом и углеродом на поверхности. Этот начальный режим называется кинетическим и описывается с помощью степенного закона Аррениуса:

$$G_w = B\left(p_N\right)_w^n \exp\left(-\frac{E}{RT_w}\right), \tag{1}$$

$$p_N = X_N p_e, \tag{2}$$

где n – порядок реакции; B – предэкспонентный множитель; E – энергия активации; G_w – скорость уноса массы; T_w – температура у поверхности; X_N – мольная концентрация азота у поверхности; p_e – давление на внешней границе пограничного слоя.

Поток массы циана (CN) от поверхности материала при кинетическом режиме разрушения можно оценить, используя следующие положения молекулярно-кинетической теории. Полный (максимально возможный) поток компоненты i с массовой концентрацией C_i в газе с плотностью вблизи стенки ρ_w к твёрдой поверхности определяется соотношением

$$J_i^* = \rho_w C_i V^*. \tag{3}$$

Здесь $V^* = \frac{1}{4}\left(\frac{8kT}{\pi m_i}\right)^{\frac{1}{2}}$ – интеграл функции распределения частиц (Максвелла) по скоростям по направлению к стенке.

Вероятность реакции есть отношение потока частиц, вступающих в реакцию J_i, к полному потоку J_i^*:

$$\gamma = \frac{J_i}{J_i^*}. \tag{4}$$

Получены значения вероятностей реакций атомарного азота с поверхностью образцов из углерода $\gamma(T)$. Проведён анализ результатов и их сопоставление с данными других авторов (рис. 2).

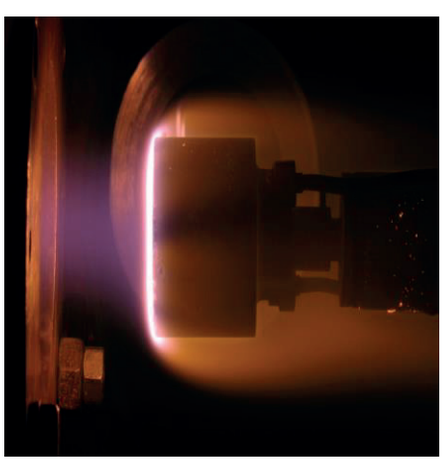


Рис. 1. Снимок эксперимента

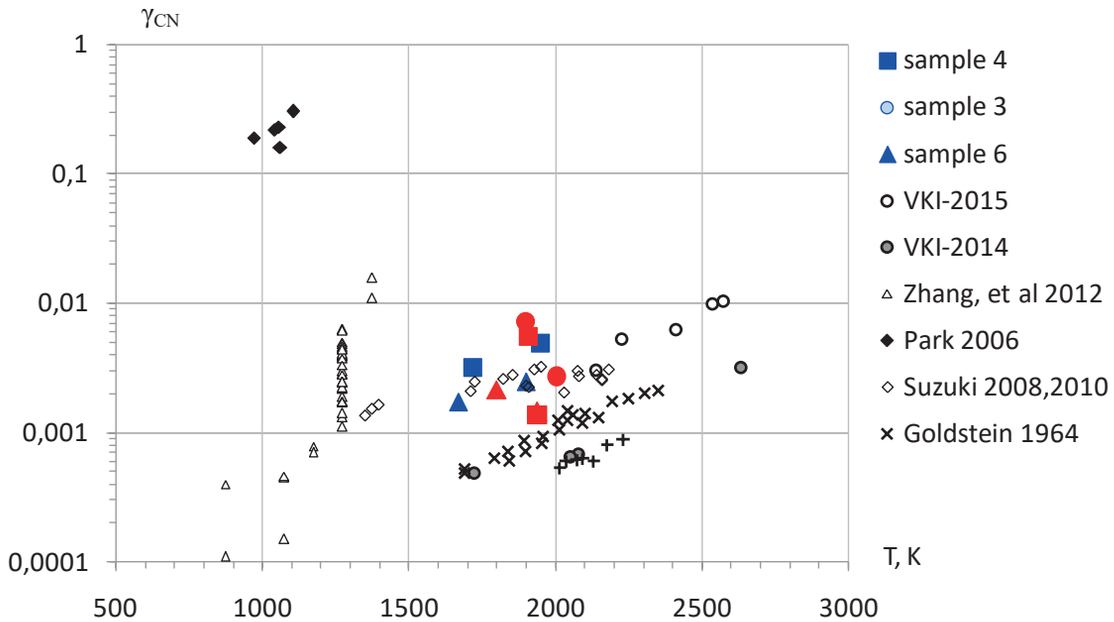


Рис. 2. Зависимость вероятности реакции от температуры поверхности. Крупные квадратные и треугольные маркеры соответствуют рассчитанным значениям вероятности реакции атомарного азота с поверхностью различных углеродных образцов

Литература

1. *Goldstein, H.W.* The reaction of active nitrogen with graphite // J. Phys. Chem. 1964. V. 68, N. 1, P. 39–42.
2. *Лунёв В.В.* Течение реальных газов с большими скоростями. М.: Физматлит, 2007. 760 с.

УДК 534.64

Экспериментальное определение акустических свойств материалов, составляющих многослойную трансформируемую оболочку космических модулей

К.И. Зайцев, А.Л. Половнев, С.Д. Пушкин

ПАО Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва

Одним из направлений развития пилотируемой космонавтики является создание трансформируемых (надувных) модулей, которые выводятся на орбиту в компактном сложенном состоянии, а уже на месте развёртываются в полном размере. Примерами таких разработок являются проект TransHab (NASA) [1] и пристыкованый к МКС в 2016 модуль BEAM (BigelowAerospace) [2].

В РКК «Энергия» также ведутся работы по проектированию трансформируемых модулей, созданию и экспериментальной отработке многослойной трансформируемой гермооболочки [3].

На участке выведения космического аппарата (КА) его конструкция, приборы и оборудование подвергаются воздействиям акустического давления, обусловленного интенсивным акустическим излучением реактивных струй маршевых двигателей ракеты-носителя (РН). При старте и полете РН в плотных слоях атмосферы подавляющее большинство КА защищено от внешних воздействий головным обтекателем (ГО). ГО блокирует часть энергии внешнего акустического поля, снижая амплитуды акустического

давления на внешнюю поверхность КА. Это справедливо и для трансформируемых обитаемых космических модулей (ТОКМ).

Акустическое поле внутри герметичных отсеков КА определяется звукоизолирующими свойствами его оболочки. Металлическая оболочка стандартных КА обладает значительной звукоизоляцией. Для прогноза характеристик акустических воздействий на бортовое оборудование ТОКМ и анализа их соответствия действующим условиям эксплуатации необходимо определить звукоизолирующие свойства многослойной трансформируемой гермооболочки модуля (МТГО).

Кроме того, в процессе штатной эксплуатации модуля, важно учитывать шум от его бортового оборудования, особенно для обитаемых отсеков. Существуют санитарные нормы шумовых воздействий на экипаж пилотируемых космических аппаратов для обеспечения комфортной работы космонавтов. Для расчётов таких воздействий важно знать коэффициент звукопоглощения внутренней поверхности МТГО.

При падении звуковой волны на бесконечную преграду часть звуковой энергии поглощается, часть отражается, а часть проходит через преграду (рис. 1).

Интенсивности акустических волн связаны между собой соотношением

$$I_{\text{пад}} = I_{\text{отр}} + I_{\text{погл}} + I_{\text{пр}}. \quad (1)$$

Коэффициент звукопоглощения α определяется по формуле

$$\alpha = 1 - \frac{I_{\text{отр}}}{I_{\text{пад}}}. \quad (2)$$

Коэффициент звукопроводности τ и используемое на практике производное значение звукоизоляция R определяются по формулам

$$\tau = \frac{I_{\text{пр}}}{I_{\text{пад}}}, \quad (3)$$

$$R = -10\, lg\, \tau. \quad (4)$$

Для определения звукоизоляции и коэффициента звукопоглощения проводились испытания фрагмента оболочки в акустической камере и в импедансной трубе (трубе Кундта).

Фрагмент МТГО представляет собой многослойную сборку из материалов с различным функционалом: микрометеороидная защита, экранно-вакуумная теплоизоляция (ЭВТИ), армирующие слои, интерьерные материалы. Внешний вид фрагмента представлен на рис. 2.

Метод измерения изоляции воздушного шума ограждающими конструкциями заключается в измерении и сравнении средних уровней звукового давления в реверберационной камере (РК) и в акустически заглушенной камере, в проеме разделительной перегородки между которыми установлен испытываемый образец [4].

Источник звука располагается в углах помещения РК на расстоянии не менее 1 м от испытываемого образца и создает диффузное звуковое поле. Производятся измерения уровней звукового давления в РК перед образцом L_1 (в дБ) и в акустически заглушенной камере непосредственно за образом L_2 (в дБ). Изоляция воздушного шума ограждающими конструкциями определяется по формуле

$$R = L_1 - L_2 \quad (5)$$

Измерения в трубе Кундта проводились методом двух нагрузок [5, 6]. Фрагмент (послойнои в сборке) устанавливался в длинную металлическую трубу между парами микрофонов (рис. 3). С одного конца трубы он облучался акустической волной, а другой конец был открыт (для моделирования абсолютного поглощения также использовалась звукопоглощающая заглушка) или закрыт металлической торцевой заглушкой (для моделирования абсолютного отражения).

Коэффициент звукопоглощения и поверхностный импеданс отдельных материалов трансформируемой оболочки определялись также с помощью специализированного инструмента – микрофлоуна, который позволяет измерять одновременно акустическое давление и скорость колебания частиц в непосредственной близости от поверхности образца [7].

В настоящей работе представлены полученные тремя методами результаты, которые хорошо согласуются между собой. В трубе Кундта дополнительно получены внутренние характеристики отдельных материалов, такие как характеристический импеданс, комплексные значения скорости распространения звуковых волн и эффективной плотности материала, которые позволят в дальнейшем использовать эти данные для численного моделирования распространения звуковых волн во внутреннем объеме оболочки при различных условиях внешних и внутренних акустических воздействий.

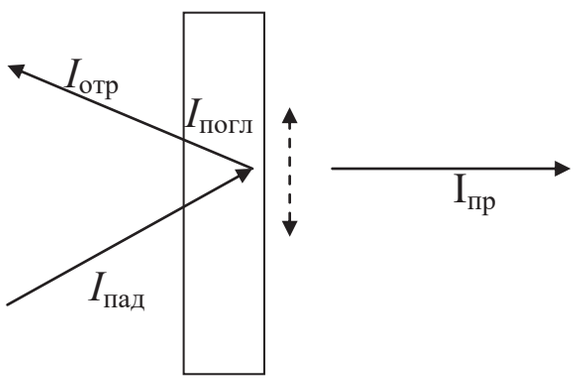


Рис. 1. Схема взаимодействия звуковой волны с преградой

Рис. 2. Фрагмент МТГО в негерметичном исполнении (400 × 400 мм, толщина ~ 340 мм)

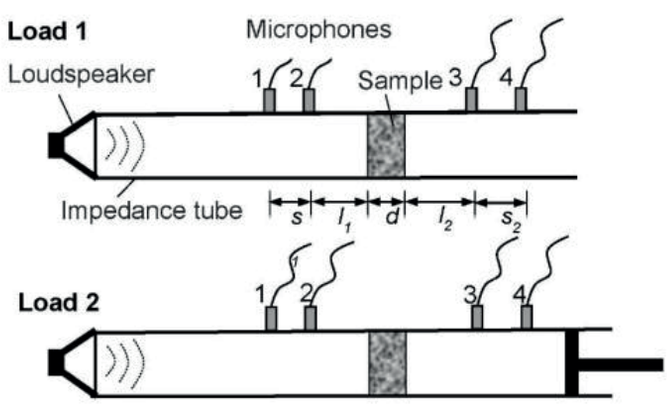


Рис. 3. Схема метода двух нагрузок

Литература

1. TransHabConcept. https://spaceflight.nasa.gov/history/station/transhab/Дата обращения: 13.10.2017.
2. BEAM. http://bigelowaerospace.com/pages/beam/ Дата обращения 13.10.2017.
3. *Хамиц И.И.* [*и др.*]. Трансформируемые крупногабаритные конструкции для перспективных пилотируемых комплексов // Космическая техника и технологии. 2016. № 2(13). С. 23–33.
4. ГОСТ 27296-87. Защита от шума в строительстве. Звукоизоляция ограждающих конструкций. Методы измерения.
5. Acoustic absorbers and diffusers: theory, design, and application / Trevor J. Cox and Peter D'Antonio. — 2nd ed. 2009.
6. *Li Wanlu*. Experimental studies on the determination of acoustic bulk material properties and transfer impedance. Theses and Dissertations-–Mechanical Engineering.. 48.
7. *Lanoye R., Vermeir G., Lauriks W., Kruse R., Mellert V.* Measuring the free field acoustic impedance and absorption coefficient of sound absorbing materials with a combined particle velocity-pressure sensor. // J. Acoust. Soc. Am. May 2006. 119 (5). Pp.2826–2831.

УДК 533.6

Компьютерное моделирование обтекания вращающихся затупленных конусов с целью определения коэффициента демпфирования крена

А.В. Сосин

Московский физико-технический институт (государственный университет)
Центральный научно-исследовательский институт машиностроения

При вращении осесимметричного тела вокруг продольной оси *Ox* с некоторой угловой скоростью ω_x возникает демпфирующий момент M_x, обусловленный силами поверхностного трения. Коэффициент демпфирования момента крена определяется по формуле

$$M_x^{\omega_x} = \frac{\partial m_x}{\partial \bar{\omega_x}}.$$

Здесь $m_x = \frac{M_x}{\rho_\infty V_\infty^2 SL}$ – безразмерный демпфирующий момент, $\bar{\omega_x} = \frac{\omega_x}{V_\infty} L$ – безразмерная частота вращения тела, S – площадь дна, L – длина конуса, индекс ∞ отвечает за параметры набегающего потока.

Задача обтекания вращающегося тела имеет большое применение: многие спускаемые аппараты при движении закручиваются вокруг оси симметрии для равномерности обгара и уноса вещества с поверхности тела. При неравномерном обгаре за счет уноса теплозащитного покрытия форма летательного аппарата может изменяться, из-за этого возникают дополнительные аэродинамические силы и моменты, вследствие которых точка падения будет удаляться от расчетной.

Проведено численное моделирование сверхзвукового обтекания модели затупленного вытянутого конуса с вращением вокруг оси вращения конуса при различных параметрах набегающего потока и различных угловых скоростях вращения конуса. Расчеты проводились в двух программах: FloEFD (Mentor Graphics) и Layer2 (ЦНИИмаш).

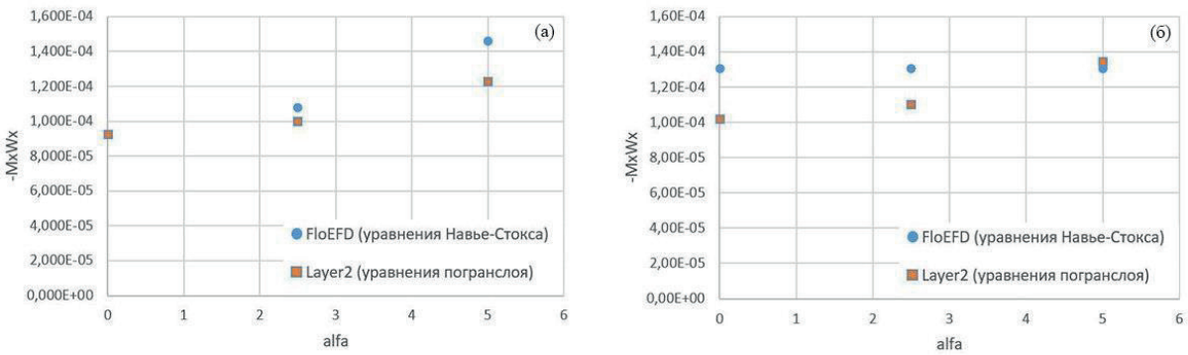


Рис .1. Сравнение коэффициента демпфирования крена при ламинарном (а) и турбулентном (б) пограничном слое на образующих конуса при различных углах атаки α(alfa). Число Маха M= 5, число Рейнольдса Re = $8 \cdot 10^4$ (а) $9 \cdot 10^5$ (б), температура стенки равна 0,8 от статической температуры набегающего потока

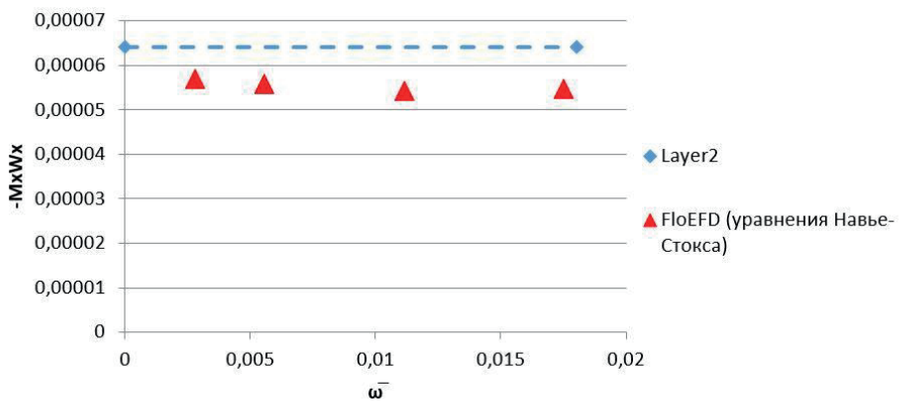


Рис. 2. Зависимость коэффициента демпфирования момента крена $M_x W_x$ от безразмерной частоты вращения тела $\bar{\omega}$. Re = 1.4·105, M = 2, адиабатическая стенка

Литература

1. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974.
2. *Липницкий Ю.М., Красильников А.В., Покровский А.Н., Шманенков В.Н.* Нестационарная аэродинамика баллистического полёта. М.: Физматлит, 2003.
3. *Покровский А.Н., Шманенков В.Н., Щучинов В.М.* Определение параметров пограничного слоя на вращающихся осесимметричных конусах. // Известия АН СССР, МЖГ 1984. №3, С. 34–39.
4. *Trebunskikh T.V., Ivanov A.V., Dumnov G.E.* FloEFD simulation of micro-turbine engine, Mentor Graphics. Moscow, 2011.
5. *Лихачева Е.С., Сосин А.В., Шманенков В.Н.* К расчету демпфирующего момента крена конуса в сверхзвуковом потоке. // Космонавтика и ракетостроение. 2017. № 2(95).

УДК 538.93

Применение метода прямого статистического моделирования Монте-Карло для решения задач тепломассообмена

Р.А. Бегалиев

Московский физико-технический институт (государственный университет)
Центральный научно-исследовательский институт машиностроения

Известно, что газ состоит из элементарных частиц – молекул. Движение каждой отдельной молекулы в основном может быть описано уравнениями Ньютона классической механики кроме довольно коротких промежутков взаимодействия молекул между собой. Эти процессы рассматриваются в рамках квантовой механики. Но в первом приближении даже столкновения молекул могут быть рассмотрены методами классической механики [1]. Метод прямого статистического моделирования основан на построении процесса, который моделирует или, скорее, имитирует движение молекул, их взаимодействие между собой и с границами расчётной области. Основная идея метода прямого статистического моделирования заключается в том, чтобы заменить реальный поток газа движением некоторого небольшого числа моделирующих частиц или просто частиц. Фактически молекулы газа объединяются в молекулярные пучки. Каждый такой пучок и есть моделирующая частица. Таким образом, каждая моделирующая частица состоит из большого числа реальных молекул газа. Внутри пучка все молекулы имеют одни и те же свойства, и, следовательно, температура движения молекул газа внутри пучка равна нулю [2].

Задачи по определению потоков массы и теплового потока всегда представляли особый интерес и имели практическое применение потому, что значения потоков нужны для нахождения коэффициентов диффузии и теплопроводности. Создана методика и программа численного моделирования для решения задач тепло- и масса-переноса методом прямого статистического моделирования Монте-Карло. Рассмотрена задача теплообмена между двумя стенками, и на её примере проведена верификация созданной программы.

Также поставлена и решена задача по испарению углерода в атмосфере аргона. В расчётную область вводится бинарная смесь с температурой 300 К. Начальные температуры на стенках равны 300 К и 20 500 К. Для углерода введены процессы конденсации на обеих стенках и испарения на «горячей» стенке, аргон зеркально-диффузно отражается от обеих стенок с коэффициентом аккомодации равным 0,9.

В процессе решения данной задачи выявлены проблемы усреднения величин в методе прямого статистического моделирования Монте-Карло. В результате создана новая методика по усреднению величин.

Литература

1. *Боголюбов Н.Н.* Избранные труды по статистической физике. М.: Изд. МГУ, 1979. 114 с.
2. *Bird G.A.* Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows. Oxford: Clarendon Press. 1994. P. 458.

УДК-531

Расчётно-экспериментальный подход к моделированию механического и прочностного поведения конструкционных материалов с использованием метода томографической диагностики и новейших средств проведения испытаний со сверхпрецизионной точностью измерений

М.В. Захарова

Центральный научно-исследовательский институт машиностроения
Московский физико-технический институт (государственный университет)

Материалы несущих конструкций летательных аппаратов в ходе эксплуатации подвергаются высоким механическим нагрузкам. При проектировании конструкций предъявляются высокие требования к точности расчетов запасов прочности, которые определяются соотношением: $n = \frac{P_{\text{пред}}}{P_{\text{экспл}}}$, где $P_{\text{пред}}$ – нагрузка, при которой происходит разрушение, $P_{\text{экспл}}$ – максимальная нагрузка при эксплуатации конструкции. При расчетах предельной нагрузки $P_{\text{пред}}$критерием прочности считается достижение предельной интенсивности пластических деформаций в какой-либо зоне конструкции.

В настоящей работе исследуется связь предельной интенсивности пластических деформаций и типа напряженного состояния. Напряженное состояние определяется инвариантами тензора напряжений $[\sigma]$:

$$p = -\sigma_m = -\frac{1}{3}tr([\sigma]) = -\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3),$$

$$q = \bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2}[S] : [S]} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]},$$

$$r = \left(\frac{9}{2}[S] \cdot [S] : [S]\right)^{1/3} = \left[\frac{27}{2}\det([S])\right]^{1/3} = \left[\frac{27}{2}(\sigma_1 - \sigma_m)(\sigma_2 - \sigma_m)(\sigma_1 - \sigma_m)\right]^{1/3},$$

где p, q, r – 1-й, 2-й и 3-й инварианты тензора напряжений, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения, S – девиатор тензора напряжений, p, σ_m – давление и среднее напряжение сответственно.

Тип напряженного состояния характеризуется безразмерными параметрами.

- Объемностью (коэффициент трехосности): $\eta = \frac{-p}{q} = \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}}$,
- Углом Лоде: $\bar{\theta} = 1 - \frac{6\theta}{\pi} = 1 - \frac{2}{\pi}\arccos(\xi)$, где $\xi = \left(\frac{r}{q}\right)^3 = \cos(3\theta)$.

Другими словами, цель работы – определение вида зависимости предельной интенсивности деформации от типа напряженного состояния $\varepsilon_{\text{пред}} = f(\eta, \bar{\theta})$. Исследовалось растяжение образцов из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Рассматривался гладкий цилиндрический образец, а также образцы с кольцевыми выточками (концентраторами) радиусов 2,5 мм, 1 мм, 0,5 мм.

Исследование проводилось следующим образом.

- Образец растягивался с постоянной скоростью перемещения захватов на сверхпрецизионном испытательном оборудовании. Определялся момент инициации разрушения. Эксперимент останавливался.

- Проводилась томографическая диагностика испытанных образцов. Определялось место инициации разрушения.

- Определялась связь расчетных параметров напряженного состояния с местом разрушения. Расчет напряженно-деформированного состояния проводился с помощью программного комплекса SIMULIA Abaqus в геометрически и физически нелинейной постановке. В качестве модели материала использовался вариант теории пластического течения с нелинейным изотропным упрочнением.

В ходе изучения образцов с выточкой выявлена нетипичная зависимость. Максимальные деформации реализуются вблизи концентраторов, однако инициация разрушения происходит в середине образца, как и в случае гладкого цилиндра (рис. 1). Это показывает, что предельная деформация материала не является константой, а зависит от типа напряженного состояния.

На рис. 2 представлена выявленная зависимость предельной деформации от коэффициента объемности для всех исследуемых образцов (найдена функция $\varepsilon_{\text{пред}} = f[\eta, \bar{\theta}]$). Угол Лоде в данной серии испытаний не изменялся и составлял $\bar{\theta} = 1$.

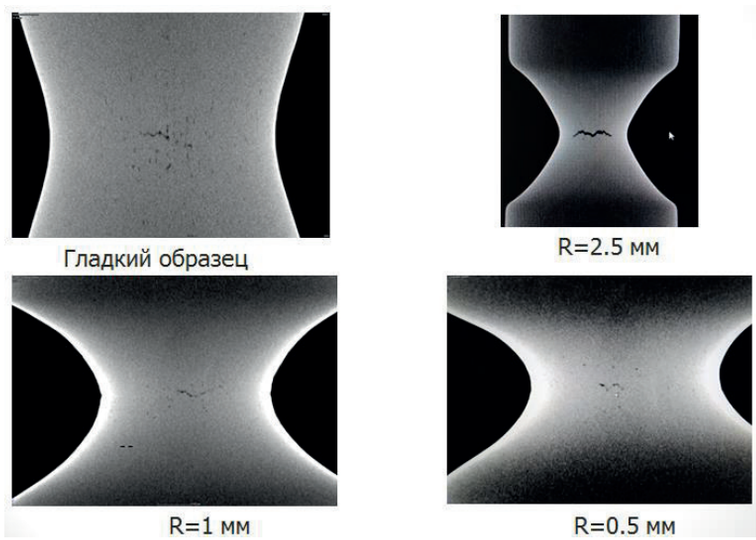


Рис. 3. Результаты томографии образцов, остановленных в момент инициации разрушения, для гладкого образца и образцов с выточками R = 2,5 мм, 1 мм, 0,5 мм

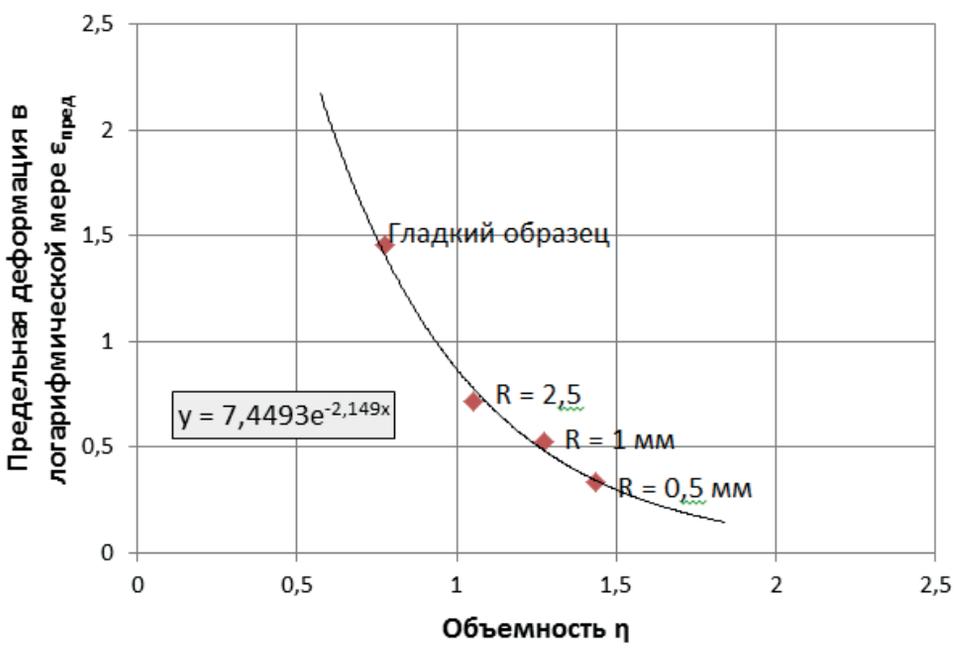


Рис. 4. Зависимость предельной деформации от коэффициента объемности

Литература

1. *Bai Y.*, *Wierzbicki T.* A new model of metal plasticity and facture with pressure and Lode dependence // International journal of Plasticity. 2008. V. 24. P. 1072–1096.

Секция перспективных технологий для систем безопасности

УДК 533.69

Расчётные исследования аэродинамических характеристик прямоугольного крыла с несимметричным профилем с помощью программного комплекса ANSYS CFX

Д.С. Аниськин, А.Б. Андреев

Центральный научно-исследовательский институт химии и механики

Основными характеристиками беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), функцией которых является доставка целевой нагрузки на заданное расстояние, являются характеристики крейсерского полёта, такие как дальность и скорость полёта на заданной высоте, радиус применения аппарата.

При разработке БЛА подобного типа точность определения аэродинамических характеристик является ключевым фактором влияющем на эффективность будущего аппарата.

В докладе приводится пример расчёта крыла в программном комплексе Ansys CFX. Исследуется прямоугольное крыло с несимметричным профилем Clark-YH для разных вариантов относительной толщины: 8, 11, 14%. Такая форма и профиль крыла наиболее характерны для БЛА, выполняющих подобные задачи.

Также в докладе приводится сравнение результатов математического моделирования с натурными испытаниями.

УДК 629.7.05

Алгоритм определения углов тангажа и креналетательного аппарата при маневрировании

А.П. Ганцев

Центральный научно-исследовательский институт химии и механики

Одним из популярных способов повышения точности определения ориентации в бесплатформенных инерциальных системах (БИНС) является применение коррекции по наблюдению проекций ускорения силы тяготения (g) на оси трехосевого акселерометра, закрепленного в центре масс летательного аппарата (ЛА). Этот способ позволяет однозначно определять углы крена и тангажа независимо от местоположения ЛА. Существенным недостатком такого способа коррекции является трудность оценки составляющих g из измерений акселерометра при маневрировании.

В работе предлагается альтернативный способ определения углов крена и тангажа ЛА по данным микромеханических акселерометров с использованием информации о составляющих скорости движения ЛА.

Предложенный вариант оценки гравитационной составляющей позволяет осуществлять коррекцию углов ориентации при значительных перегрузках ЛА на длительных интервалах времени, тем самым обеспечивая корректное оценивание дрейфа гироскопов и предотвращая разориентирование БИНС. Представлены данные математического моделирования алгоритма.

УДК 519.245 : 521.3

Расчёт коррекции орбитального движения космического аппарата типа CubeSat после выведения в приближении модели SGP4 с учётом временных ограничений

Р.А. Крымов[1,2], Е.А. Цветков[1,2]

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2]Центральный научно-исследовательский институт химии и механики

С экономической точки зрения космический аппарат (КА) формата CubeSat выгодно запускать в качестве попутной нагрузки, выводя его на орбиту, отличную от целевой. В связи с этим возникает необходимость осуществления межорбитального перелёта, причём КА необходимо оказаться на целевой орбите с определённой фазой, которая меняется со временем. Такое требование возникает, например, в задачах дистанционного зондирования Земли или картографирования: КА должен пролетать над определёнными участками поверхности Земли в те моменты времени, когда они освещены Солнцем. Задача осложняется тем, что орбита выведения и целевая орбита могут быть некомпланарны и существенно отличаться от круговых, а требуемый манёвр должен соответствовать имеющемуся запасу характеристической скорости и укладываться во время, отведённое на достижение целевой орбиты.

Предполагается, что тяга, создаваемая двигательной установкой КА, достаточно велика, чтобы было применимо импульсное описание манёвров. Один маневровый импульс имеет три компоненты, поэтому для шестипараметрической коррекции исходной траектории КА необходима, по меньшей мере, двойная коррекция траектории. Первый импульс (стартовый) обеспечивает переход КА на промежуточную орбиту, пересекающую целевую орбиту, а второй необходим для выравнивания скорости, то есть реализует переход КА на целевую орбиту. Описанный метод, называемый методом свободных траекторий [1], позволяет осуществить требуемый манёвр, причём в отсутствие погрешностей определения координат и скорости КА и выдачи импульсов ДУ моменты времени и компоненты маневровых импульсов могут быть рассчитаны заранее с требуемой точностью.

Подробно описанные в литературе классические межорбитальные манёвры, такие как перелёты по эллипсам Гомана–Цандера [2, 3] или биэллиптические перелёты [2, 3], осуществимы только между компланарными круговыми орбитами, к тому же такие манёвры могут быть невыполнимы из-за превышения временных или энергетических ограничений. Для решения задачи выхода на целевую орбиту применяется алгоритм с переменным временем перелёта [4]: моменты времени начала и конца манёвра подбираются в заданных рамках методом Монте-Карло для нахождения наиболее экономичного перелёта. Расход характеристической скорости для каждого варианта времени начала и конца манёвра определяется с помощью решения задачи Ламберта [3, 4] для положения КА на исходной орбите в момент стартового импульса, требуемого положения КА на целевой орбите в момент окончания манёвра и времени перелёта.

Указанные алгоритмы позволяют рассчитать маневровые импульсы для Кеплерова приближения (невозмущённого движения), в то время как для более точного описания орбитального движения КА (учёта возмущений) широко применяется модель SGP4. Использование первоначально рассчитанных манёвров приводит к значительному рассогласованию между требуемыми и фактическими координатами и скоростями КА в конце манёвра. Для решения этой проблемы предложено использовать параметры стартового маневрового импульса, рассчитанные в Кеплеровом приближении, в качестве начального приближения при поиске локального минимума функции-невязки, представляющей собой взвешенную сумму величины рассогласования между требуемым и фактическим положением КА в конце манёвра и суммарного расхода характеристической скорости. Строгое аналитическое обоснование надёжности работы такого алгоритма затруднительно, поэтому для гарантии работоспособности проводится проверка алгоритма на большом количестве различных начальных условий.

Литература

1. *Раушенбах Б.В., Овчинников М.Ю.* Лекции по динамике космического полёта. М.: МФТИ, 1997. 188 с.
2. *Охоцимский Д.Е.*, *Сихарулидзе Ю.Г.* Основы механики космического полёта. М.: Наука, 1990. 448 с.
3. *Суханов А.А.* Астродинамика. М.: ИКИ РАН, 2010. 204 с.
4. *Vallado D.A.* Fundamentals of Astrodynamics and Applications. Hawthorne: Microcosm Press, 2007. 1055 p.

УДК 004.942

Проведение баллистических расчётов с использованием модели SGP4 на графическом ускорителе

Р.А. Бычков[1], Е.А. Цветков[1,2]

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2]Центральный научно-исследовательский институт химии и механики

В некоторых задачах, связанных с расчетом и анализом траекторий космических аппаратов, требуется знание положения большого числа спутников в конкретный момент времени либо точное положение одного спутника с малым шагом по времени. Для удовлетворения этих требований необходимо проведение большого объема вычислений.

Целью данной работы является увеличение скорости расчета траекторий с использованием модели SGP4 [1] путем проведения параллельных вычислений на NVIDIA CUDA [2, 3]. В качестве модельной выступает задача о предсказании опасных сближений КА в околоземном космическом пространстве. Вычислительная сложность этой задачи заключается в том, что необходимо оценивать расстояние между КА по схеме «каждый с каждым» с небольшим шагом по времени.

Технология CUDA позволяет проводить расчет на видеокартах NVIDIA. Особенностью параллельных вычислений на видеокарте является «легкость» каждого потока: запуск и уничтожение потоков не требует больших затрат по времени. В модели SGP4 для расчёта положения КА необходимо указать начальные условия и момент времени. Таким образом, модель SGP4 можно переложить на видеокарту не только по схеме «один поток – один спутник», но и «один поток – одна точка одного спутника», что представляется наиболее эффективным, так как приводит к более симметричной нагрузке вычислительных узлов видеокарты.

Вычисление расстояний между КА также проводится с использованием технологии CUDA. Для каждой пары спутников создаётся свой поток, выполняющий вычисление расстояния между ними.

Оптимизация расчета на видеокарте в первую очередь проводится путем использования наиболее эффективных алгоритмов и улучшения работы с памятью. В данной работе рассматриваются: модель памяти CUDA, шаблоны параллельных коммуникаций и фундаментальные алгоритмы параллельного расчета, на основе этой информации проводится оптимизация параллельных вычислений. Для контроля за оптимизацией и оценки ускорения за счет использования видеокарты используется программа NVIDIA Visual Profiler.

Литература

1. *Vallado D.A.*, *Crawfold P.*, *Hujsak R.*, *Keslo T.S.* Revisiting spacetrack report No. 3: Rev 1. Technical Report AIAA 2006-6753-Rev1. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006.
2. CUDA C Programming Guide. Design Guide. PG-02829-001_v9.0 URL:http://docs.nvidia.com/cuda/pdf/CUDA_C_Programming_Guide.pdf (дата обращения: 10.10.2017).

3. CUDA C Best Practices Guide. Design Guide. DG-05603-001_v9.0.URL:http://docs.nvidia.com/cuda/pdf/CUDA_C_Best_Practices_Guide.pdf (дата обращения: 10.10.2017).

УДК 517.977: 629.7.054.07

Пассивный способ определения параметров конфигурации «созвездия» космических аппаратов типа CubeSat на основе последовательности снимков

Е.А. Цветков[1,2], Р.А. Крымов[1,2]

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2]Центральный научно-исследовательский институт химии и механики

Одной из задач, решаемых во время группового полёта, является задача определения расстояния между космическими аппаратами (КА) в составе группы. Такая задача возникает, например, как составная часть задачи о поддержании геометрической конфигурации «созвездия» КА. Наиболее распространённым способом решения является использование лазерных дальномеров, радиолокации или других активных способов, требующих установки специализированного оборудования на борт КА. Другим популярным способом, используемым в приложениях машинного зрения, является нанесение маркера с известными геометрическими размерами на поверхность КА.

В случае если расстояние между аппаратами значительно, то пассивный аппарат может проецироваться в точку, что делает невозможным вычисление видимого углового размера маркера. Для этого случая в настоящей работе предлагается метод определения расстояния, основанный на наблюдении видимого относительного движения с последующей фильтрацией.

В качестве камеры, при помощи которой определяется видимое движение пассивного КА, можно использовать камеру звёздного датчика, что актуально в случае сильных ограничений по массе. Использование широкоугольной камеры существенно упрощает задачу ориентации.

Предлагаемый подход основан на использовании фильтра UKF (Unscented Kalman Filter, [1]). В качестве состояния системы рассматривается шестимерный вектор относительных координат и скорости пассивного КА относительно активного КА. В качестве уравнений эволюции системы выступают уравнения Хилла [2]. Результатом измерений является единичный вектор направления на пассивный КА. При таком выборе вектора состояния, уравнений эволюции и функции измерений система является ненаблюдаемой.

В работе [3] рассмотрена похожая задача, но вместо уравнений Хилла использовалось приближение равномерного и прямолинейного движения. В указанной работе теоретически показано, что при изменении скорости наблюдателя на известную величину, система уравнений, из которой можно установить начальные условия относительной траектории движения наблюдаемого объекта, становится разрешимой. В настоящей работе изложенная идея была применена к системе, описываемой уравнениями Хилла, а вместо решения переопределённой системы линейных алгебраических уравнений методом наибольшего правдоподобия использовался фильтр UKF. Приращение скорости учитывалось в качестве управления.

Было выполнено математическое моделирование системы двух КА. Учитывались погрешность измерения направления на пассивный КА в инерциальной системе отсчёта (2 градуса) и погрешность измерения приращения скорости в результате манёвров (20 процентов). Импульсы имели величину 10 м/с и случайное направление, равномерно распределённое внутри 4π. Время моделирования соответствовало полупериоду обращения КА вокруг Земли. Активный КА измерял направление на пассивный КА с частотой один раз в минуту. Начальное приближение выбиралось с погрешностью 100% по расстоянию.

В результате моделирования было установлено, что описанный подход работоспособен. После пяти случайных по направлению импульсов через равные промежутки времени погрешность определения расстояния составляет в большинстве случае от 50 до 100%. В целом эту величину можно считать удовлетворительной, так как без проведения измерений с последующей фильтрацией (при простом интегрировании системы уравнений движения) погрешность знания координат пассивного КА возрастает в десятки раз относительно начального значения.

Численный эксперимент подтвердил, что не все импульсы приводят к существенному уменьшению погрешности определения расстояния. Рекомендуется выбирать направления импульсов так, чтобы они оказали максимальное влияние на видимое движение пассивного КА. В случае если импульсы выбираются из соображений поддержания конфигурации «созвездия», то имеет смысл выполнить предварительный импульс с целью определения расстояния до пассивного КА, а затем рассчитать и выполнить серию импульсов, направленных на поддержание конфигурации «созвездия».

Литература

1. *Julier S.J.*, *Uhlmann J.K.* A new extension of the Kalman filter to nonlinear systems, in Proc. Aero Sense: 11th Int. Symp. Aerospace/Defense Sensing, Simulation and Controls. 1997, P. 182–193.
2. *Rauschenbach B.V.*, *Ovchinnikov M.Yu.*, *McKenna-Lawlor S.* Essential Spaceflight Dynamics and Magnetospherics // Kluwer & Microcosm Publ. 2003. 416 p.
3. *Шиханцов С. Ю.*, *Цветков Е. А.* Восстановление параметров движения объекта на основе последовательности монокулярных изображений, сделанных подвижным наблюдателем // Труды 26-й Международной конференции GraphiCon2016. 2016. С. 113–116.

УДК 620.179.4

Оптимизация геометрии адгезионного соединения при воздействии температурных нагрузок

Н.Л. Аблаева[1], А.Б. Дубовский[1], А.С. Котельников[1], С.Ю. Поташов[1], М.С. Третьякова[1], В.Е. Турков[1,2]

[1]Центральный научно-исследовательский институт химии и механики
[2]Московский физико-технический институт (государственный университет)

От прочности и долговечности клеевых соединений зависит работоспособность и надежность конечных изделий, их способность сопротивляться внешним нагрузкам и неблагоприятным воздействиям [1–3]. Задача оптимизации параметров адгезионного соединения на ранних стадиях проектирования является актуальной. Ее реализация возможна с применением современных инструментов – автоматизированных программных комплексов инженерных расчетов.

Разработана математическая модель адгезионного соединения с учетом механических и теплофизических свойств материалов рассматриваемой конструкции. В программном комплексе, основанном на методе конечных элементов, проведена численная оценка напряженно-деформированного состояния элементов конструкции при температурных нагрузках с применением термо-структурного двусвязного анализа. Предложена оптимальная геометрия клеевого соединения, имеющего в своем составе упруго-пластичный адгезив и адгезив постоянной липкости.

В качестве критерия прочности был использован эффективный коэффициент запаса прочности (ЭКЗП), показывающий относительное количество ячеек конечно-элементной модели интересующей области исследуемого адгезива, в которых значения напряженно-деформированного состояния не достигают предельно-допустимых.

Литература

1. *Mohammed Waseem H.S., Kiran Kumar N*. Finite Element Modeling for Delamination Analysis of Double Cantilever Beam Specimen // SSRG International Journal of Mechanical Engineering (SSRG-IJME). 2014. V. 1, N 5. P. 27–33.
2. *Turon A., Camanho P.P., Costa J., Renart J*. Accurate simulation of delamination growth under mixed-mode loading using cohesive elements: Definition of interlaminar strengths and elastic stiffness // Composite Structures. 2010. P. 1857–1864.
3. *Adams R.D., Peppiatt N.A.* Stress analysis of adhesive-bonded lap joints // Strain analysis. 1974. P. 185.

УДК 577.322

Распределения атомов белка на поверхности глобулы для структур, определенных методами РСА, ЯМР и КЭМ

А.В. Софронов, А.Ю. Лизунов

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Проанализирован атомарный состав поверхности, доступной растворителю, для пространственных структур белков. Определена доля атомов различных типов для диапазонов значений параметра SAS – доли поверхности атома, доступной растворителю (solvent available surface). Рассматривались структуры белков, определенные тремя методами: методом рентгеноструктурного анализа (РСА), ядерного магнитного резонанса (ЯМР) и криоэлектронной микроскопии (КЭМ).

В молекуле белка рассматривались только тяжелые атомы (то есть не водороды), не принадлежащие основной цепи белка и имеющие только одну ковалентную связь с другим тяжелым атомом белка. Атомы группировались в соответствии с пятью типами типизации Тарасова–Мурышева [1]: тип C – включает в себя все атомы углерода, N – все атомы азота, OA – кислород амидной группы, OH – кислород гидроксильной группы и OP – полярный кислород карбоксильной группы. Таким образом, учитывались атомы: типа C в аминокислотных остатках ILE, THR, VAL, ALA, LEU, MET, типа N – в остатках ASN, LYS, ARG, GLN, типа OA – в остатках ASN, GLN, типа OH – в остатках SER, THR, TYR и типа OP – в остатках GLU, ASP.

Из базы данных пространственных структур белков Protein Data Bank (PDB) [2] было отобрано 956 РСА-структур, удовлетворяющих ряду требований: достаточно большой размер белка; отсутствие лигандов или молекул РНК и ДНК; отсутствие контактов белка с клеточными мембранами; разнообразие первичных последовательностей белков. По похожим критериям были отобраны 133 ЯМР-структуры и 14 КЭМ структур.

Для расчета SAS использовался алгоритм Shrake-Rupley [3], позволяющий получить SAS как долю поверхности, доступной растворителю, для каждого атома. Алгоритм заключается в построении точек на сфере радиуса Ван-дер-Ваальса для каждого атома и определении для каждой точки параметра buried/accessible на основании расстояний до соседних атомов и радиуса виртуального зонда, играющего роль атома растворителя.

Качественная зависимость доли атомов различных типов от рассматриваемого диапазона параметра SAS для структур белков, определенных различными методами (рис. 1), совпадает. Доля гидрофобных атомов C убывает, а доля полярных атомов OP и N возрастает с ростом SAS. Однако для структур белков, расшифрованных методами РСА и ЯМР, рассматриваемая зависимость все же отличается. Это различие может быть как случайным эффектом или следствием различия в выборке белков, так и следствием кристаллизации белков, необходимой для проведения рентгеноструктурного анализа. Неизменность поверхностного распределения атомов при кристаллизации белков для проведения РСА анализа является принципиальным условием для применимости РСА-структур для вывода усредненных потенциалов для оценки энергии взаимодействия атомов с растворителем.

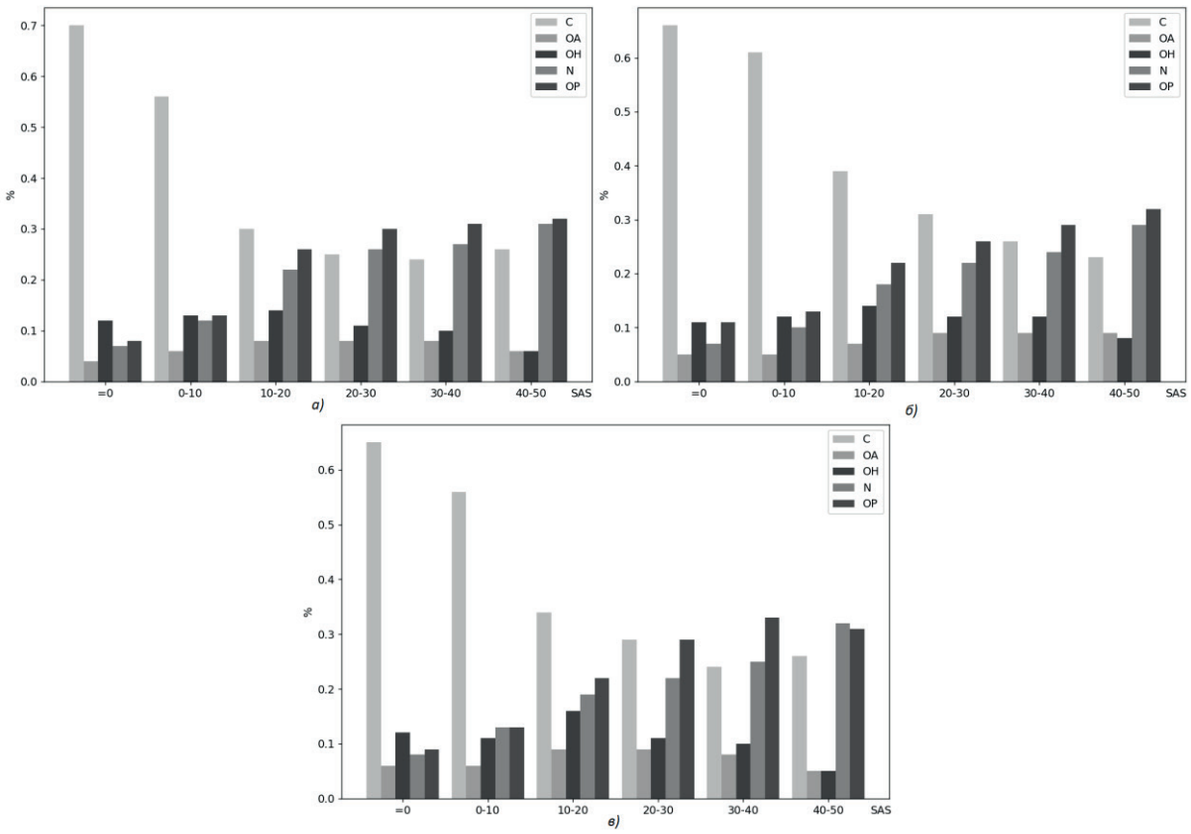


Рис. 1. Зависимость относительной доли атомов различных типов от рассматриваемого диапазона значений SAS. а) для РСА-структур, б) для ЯМР-структур и в) для КЭМ-структур

Литература

1. *Muryshev A.E., Tarasov D.N., Butygin A.V.* [*et al.*]. A novel scoring function for molecular docking. // J.Comput.-Aided Mol. Des. 2003. Vl. 17, No. 9. P. 597–605.
2. https://www.rcsb.org/pdb.
3. *Shrake A. & Rupley J.A*. Environment and Exposure to Solvent of Protein Atoms. Lysozyme and Insulin // J. Mol Biol. 1973. 79. P. 351–371.

УДК 621.314.222

Изготовление микротрансформатора по МЭМС технологии

А.А. Баранов, С.А. Жукова, Д.Ю. Обижаев, В.Е. Турков

Центральный научно-исследовательский институт химии и механики

Интегральные трансформаторы находят все большее применение при создании широкого спектра компонентов СВЧ интегральных схем, включая усилители с низким уровнем собственных шумов, генераторы, управляемые напряжением, микшеры [1] и изготавливаются в планарном и трехмерном исполнении [2–3], однако отмечается преимущество последних, состоящее в более высоких значениях добротности и индуктивности катушек микротрансформатора, а также меньшей занимаемой площади на ИС.

В настоящей работе формирование трехмерных катушек микротрансформатора, внешний вид фрагмента которых представлен на рис. 1, осуществлялось по технологии МЭМС, включающей фотолитографию с использованием негативных толстопленочных фоторезистов и электрохимическое осаждение меди. Причем основные технологические

операции изготовления заключались главным образом в последовательном формировании нижних и верхних сегментов катушек, соединенных столбчатыми выводами, а также электрохимическом осаждении материала ферромагнитного сердечника.

Для формирования столбчатых выводов катушек микротрансформатора методом электрохимического осаждения меди было использовано суперконформное заполнение микроотверстий [4]. С целью заполнения микроотверстий «снизу-вверх» был использован электролит, содержащий ингибирующую и ускоряющую органические добавки. Благодаря замедлению осаждения меди на стенках и ускорению осаждения на дне микроотверстия, в комбинации данные органические добавки позволяют обеспечить беспустотное равномерное заращивание отверстий без образования наростов, дендритов. При этом в качестве ингибирующей добавки был использован полиэтиленгликоль, вследствие большого размера и малой диффузии молекул не достигающий дна микроотверстий и образующий на стенках микроотверстий пассивирующий слой, в свою очередь 3-меркапто-пропан-сульфонат, используемый в качестве ускоряющей добавки, адсорбируется на дне и замещает подавляющий агент, приводя к увеличению скорости осаждения. Указанные органические добавки также позволяют уменьшить размер зерен осажденной меди, по-видимому, в результате увеличения числа центров зародышеобразования.

Таким образом, разработанная технология изготовления катушек микротрансформатора с высотой столбчатых выводов до 50 мкм позволяет использовать ферромагнитные сердечники с высокой площадью поперечного сечения, а исследуемые резонансные характеристики свидетельствуют о пригодности данных катушек для работы в низкочастотном диапазоне.

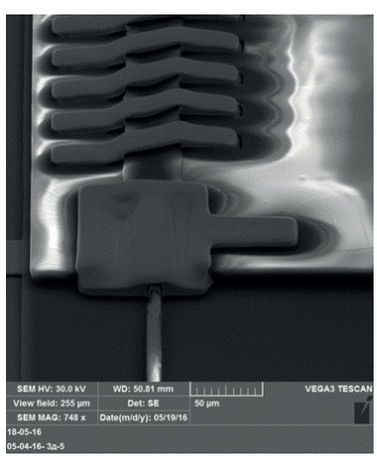


Рис. 1. Микрофотография СЭМ фрагмента катушки микротрансформатора

Литература

1. RF MEMS: Theory, Design, and Technology/ ed. by *Gabriel M. Rebeiz*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 2003.
2. *Shlomo Katz, Igor Brouk, Sara Stolyarova, Shye Shapira and Yael Nemirovsky*. High Performance MEMS 0.18µm RF-CMOS Transformers // Microelectronics Journal . 2012. V. 43. P. 13–16.
3. *Mohammad Zayed Ahmed, M.S. Bhuyan, 2A.K.M. Tariqul Islam and 1B.Y. Majlis.* Design and Fabrication of a MEMS 3D Micro-transformer for Low Frequency Applications // Asian Journal of Scientific Research. 2015. 8 (2). P. 237–244.
4. *Тюлькова А.А.* Электролиты для гальванического заполнения 3d-микропереходов // Всероссийская научно-техническая конференция студентов. Студенческая научная весна 2015: Машиностроительные технологии.

УДК 629.7.052

Повышение точности обработки сигналов малогабаритного цифрового электронного компаса

А.Н. Камшилов[1], Д.Ю. Обижаев[1], А.А. Баранов[1], С.Ю. Иванов[1], С.А. Жукова[1], И.В. Шашкин[1], В.Е. Турков[1,2]

[1]Центральный научно-исследовательский институт химии и механики
[2]Московский физико-технический институт (государственный университет)

Миниатюризация и одновременное повышение точности приборов для измерений параметров магнитного поля является достаточно актуальной проблемой в настоящее время. Известны электронные компасы, работающие на основе эффекта гигантского магнитного импеданса (ГМИ) [1]. Среди миниатюрных электронных компасов они имеют наилучшую разрешающую способность при измерениях величины индукции магнитного поля. Однако чувствительность ферромагнитного датчика намного выше, чем полученная при этом погрешность электронных компасов. Уровень шума составляет ~ 10 пТл, что теоретически позволит создавать еще более точные приборы. На точность измерений оказывают большое влияние: температура чувствительного элемента, внешние паразитные магнитные поля, шумы электронных схем, которые преобразуют сигнал чувствительного элемента для дальнейшего использования.

В данной работе создана математическая модель функционирования электронного компаса на ГМИ-эффекте. Модель используется для анализа влияния температуры чувствительного элемента на выходной сигнал электронного компаса.

Литература

1. *Grosz A*., *Haji-Sheikh M.J*., *Mukhopadhyay S.C*. High Sensitivity Magnetometers// Springer. 2017.

УДК.520.6:629.7.071

Миниатюрный датчик угла Солнца на отечественной элементной базе

А.О. Шумилин[1], С.Ю. Иванов[1], О.В. Крылов[1], И.В. Шашкин[1], В.Е. Турков[1,2]

[1]Центральный научно-исследовательский институт химии и механики
[2]Московский физико-технический институт (государственный университет)

Анализ отечественных разработок в области миниатюрных датчиков угла Солнца показал, что производимые устройства недостаточно удовлетворяют требованиям, предъявляемым к массогабаритным характеристикам. Возможна дальнейшая оптимизация соотношения характеристик точности, радиационной стойкости, габаритов и энергопотребления. В связи с вышеизложенным представляется целесообразной разработка солнечного датчика с целью минимизации массогабаритных характеристик и энергопотребления при сохранении высоких требований к радиационной стойкости.

В разрабатываемом датчике в качестве чувствительного элемента был выбран четырёхсегментный фотодиод из четырех кремниевых p–n – фотодиодов, выполненных на одной подложке. Над подложкой располагается квадратное окно-маска. Сквозь это окно свет падает на фотодиоды. При перемещении источника света луч, проходящий через маску, будет перемещаться по пластине. Фототок от этих четырех фотодиодов будет пропорционален освещенной площади фотодиодов и зависеть от угла падения света. Далее сигнал усиливается и подается на вход АЦП микроконтроллера. Фильтрация и обработка аналогового сигнала уже происходит в самом микроконтроллере.

Для повышения надежности изделия планируется разработать модуль, который бы объединял в себе чувствительный элемент, аналоговую часть, АЦП в единое целое. Все эти элементы предполагается выполнить из отечественных компонентов с повышенными характеристиками по сбоеустойчивости и радиационной стойкости.

Секция теоретической механики

УДК 531

Управляемая динамика беспилотного летательного аппарата (БПЛА) с поворотными роторами

М.Ю.Шавин

Московский физико-технический институт (государственный университет)

В работе рассматривается управляемая динамика движения квадрокоптера с поворотными роторами. Аппарат состоит из корпуса и четырех роторов, которые имеют две оси вращения – горизонтальную и вертикальную. Общий вид аппарата представлен на рис. 1.

Движение центра масс аппарата определяется силами гравитации, аэродинамического сопротивления воздуха и тягой двигателей. В модели рассматриваются аэродинамические моменты, действующие на пропеллеры, моменты со стороны приводов аппарата, которые вращают и изменяют направление роторов и моменты сил, возникающие из-за тяги пропеллеров, действующие на тело аппарата. Кинематика представлена в кватернионом описании.

Динамическая модель была запрограммирована в среде Matlab Simulink. В качестве численных методов для моделирования движения БПЛА используется метод Рунге-Кутты 4-го порядка.

Синтезирован контур управления моделью БПЛА с поворотными роторами. Работоспособность предложенной модели и схемы управления продемонстрирована численными экспериментами. На основе произведённого моделирования планируется разработка и создание опытного образца БПЛА.

Рис. 1. Общий вид БПЛА с поворотными роторами

УДК 531.36

Стационарные вращения спутника в центральном гравитационном поле при наличии внутренних упругих и диссипативных сил

Н.И. Амелькин, В.В. Холощак

Московский физико-технический институт (государственный университет)

В работе в рамках ограниченной задачи изучаются стационарные движения динамически симметричного спутника с шаровым демпфером, движущегося по круговой орбите в центральном гравитационном поле. Предполагается, что при относительных перемещениях демпфера возникают как упругие, так и диссипативные силы. Движение системы описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}
&2\boldsymbol{\Lambda}' = \boldsymbol{\Lambda} \circ \mathbf{U},\\
&(\mathbf{J} - I\boldsymbol{E})\mathbf{U}' = -\mathbf{U} \times \mathbf{J}\mathbf{U} + 3\mathbf{r} \times \mathbf{J}\mathbf{r} + \mu I(\mathbf{V} - \mathbf{U}) + kI\boldsymbol{\theta},\\
&I(\mathbf{V}' + \mathbf{U} \times \mathbf{V}) = -I(\mu(\mathbf{V} - \mathbf{U}) + k\boldsymbol{\theta}),\\
&\boldsymbol{\theta}' = (V - U) + \frac{1}{2}(V - U) \times \boldsymbol{\theta} + \frac{1}{4}\boldsymbol{\theta}(\boldsymbol{\theta} \cdot (V - U)),
\end{aligned} \tag{1}$$

где $\mathbf{J}$ – центральный тензор инерции всего спутника, I – момент инерции демпфера относительно его центральной оси, μ – безразмерный коэффициент демпфирования, k – безразмерный коэффициент жёсткости, $\mathbf{r}$ – единичный вектор, сонаправленный с радиус-вектором центра масс спутника, $\boldsymbol{\Lambda}$ – кватернион единичной нормы, задающий положение базиса главных осей инерции спутника $\boldsymbol{e}_1, \boldsymbol{e}_2, \boldsymbol{e}_3$ относительно базиса Кёнига, $\boldsymbol{\theta}$ – вектор конечного поворота демпфера относительно оболочки. Через $\mathbf{U}, \mathbf{V}$ обозначены отношения абсолютной угловой оболочки и демпфера к постоянной величине угловой скорости орбитального базиса $\omega_0 = \sqrt{k / R^3}$. Штрихом обозначена производная по безразмерному времени τ в базисе $\boldsymbol{e}_1, \boldsymbol{e}_2, \boldsymbol{e}_3$, связанном с оболочкой.

На основании представленных уравнений для динамически симметричного спутника показано, что единственными предельными движениями, отличными от положений относительного равновесия, являются только вращения вокруг оси симметрии, сонаправленной с нормалью к плоскости орбиты (цилиндрические регулярные прецессии):

$$\theta = 0,\ \mathbf{e}^* = \mathbf{n},\ \mathbf{v}^* = \mathbf{u}^* = u\mathbf{n},\ \ u \in (-\infty, +\infty), \tag{2}$$

где $\mathbf{u} = \boldsymbol{U} - \boldsymbol{n}$ и $\mathbf{v} = \boldsymbol{V} - \boldsymbol{n}$ – угловые скорости оболочки и демпфера соответственно относительно орбитального базиса, $\boldsymbol{n}$ – единичный вектор безразмерной угловой скорости орбитального базиса.

Для исследования устойчивости стационарных вращений (2) была проведена линеаризация дифференциальных уравнений движения в окрестности решений (2). Результаты анализа линеаризованной системы представлены в виде диаграмм областей устойчивости и неустойчивости в пространстве параметров. Примеры указанных диаграмм приведены на рис. 1 и 2 для разных значений безразмерного коэффициента жёсткости k в плоскости параметров $\alpha = (C - I)/(A - I)$ и $\beta = u + 1$, а также на рис. 3 в плоскости параметров μ, β для сжатого спутника при фиксированном значении $\alpha = 1{,}1$ (рис. 3а), а также в плоскости параметров k, β (рис. 3б).

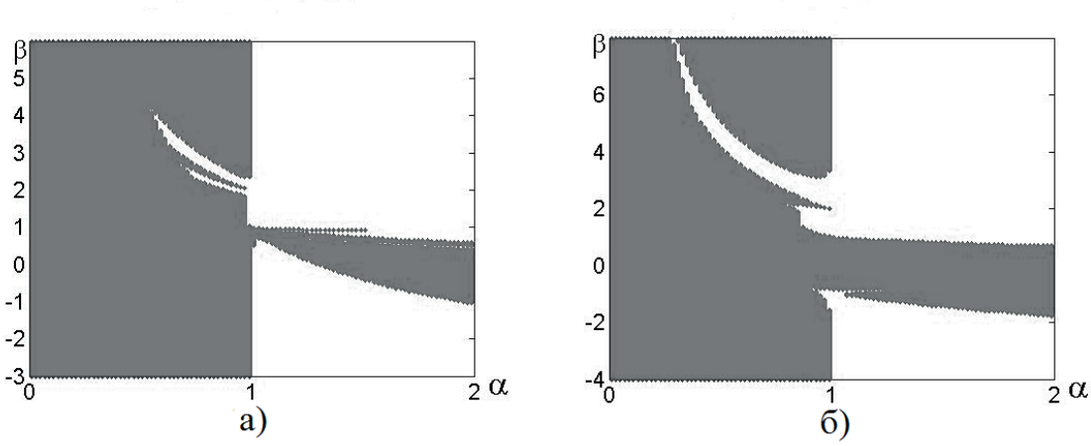


Рис. 1. Области устойчивости (не заштрихованы) и неустойчивости (заштрихованы) для $k = 0,1$ (а), 1(б), при безразмерном коэффициенте демпфирования μ=0,01

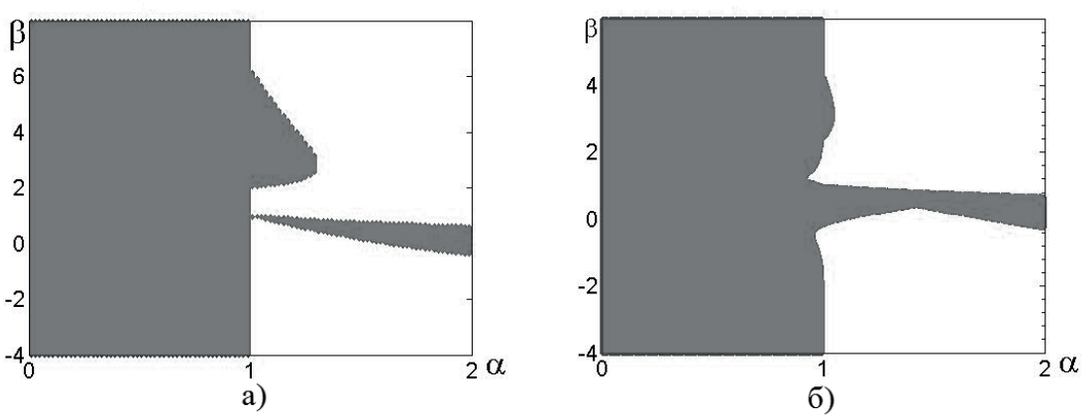


Рис. 2. Области устойчивости (не заштрихованы) и неустойчивости (заштрихованы) для $k = 0,1$ (а), 1(б), при безразмерном коэффициенте демпфирования $\mu = 1,5$

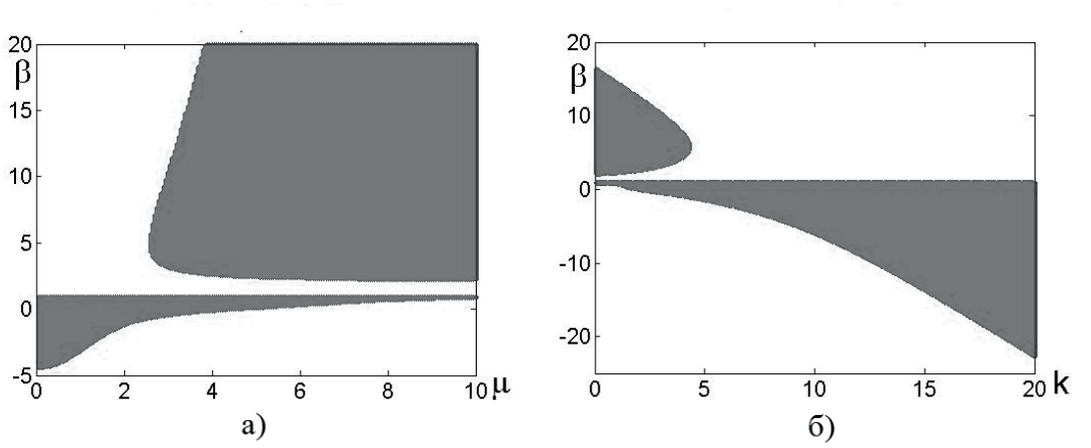


Рис. 3. Области устойчивости (не заштрихованы) и неустойчивости (заштрихованы) для сжатого вдоль оси симметрии спутника с коэффициентом $\alpha = 1,1$ при $k = 3$ (а), $\mu = 3$ (б)

Литература

1. *Амелькин Н.И., Холощак В.В.* Об устойчивости стационарных вращений спутника с внутренним демпфированием в центральном гравитационном поле // ПММ. 2017. Т. 81, № 2. С. 123–136.
2. *Черноусько Ф.Л.* О движении твердого тела, содержащего сферический демпфер // ПМТФ. 1968. № 1. С. 73–79.
3. *Маркеев А.П.* Линейные гамильтоновы системы и некоторые задачи об устойчивости движения спутника относительно центра масс. М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2009. 396 с.

УДК 531/534

Управление движением точки в канале с пульсирующей жидкостью

С.В. Семендяев

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Рассматривается модель зонда в кровеносных сосудах, управляемого извне. Зонд рассматривается в виде материальной точки, которой извне сообщается воздействие, направленное на то, чтобы зонд перемещался в канале с пульсирующей жидкостью, который моделирует кровеносный сосуд (рис. 1). Зонд можно рассматривать и в качестве робота, транспортирующего что-либо из одной точки кровеносного сосуда в другую.

Интерес к подвижным системам, не использующим внешние движители, – колеса, гусеницы, ноги – сохраняется и растет [1–5]. Новый класс механизмов (роботов, мехатронных систем), способных перемещаться в сопротивляющейся среде благодаря движению внутренних масс привлекает широкое внимание. В то же время мало рассматривается такой способ передвижения, как передвижение управлением силовым полем. В данном случае геометрия внутренних масс не изменяется, но то, как реагирует механическая система на переменное внешнее воздействие, представляет интерес в рамках постановки конкретных задач, например таких, как бесконтактное управление движением зонда в кровеносных сосудах.

Рассматривается несколько вариантов управления:

- с помощью периодически подводимого импульса, в виде дельта-функций:

$$F(t) = F_0 \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta(t - kt), \tag{1}$$

- постоянной по модулю силой:

$$F(t) = \text{const}. \tag{2}$$

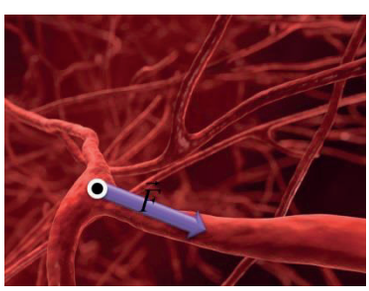


Рис. 1. Иллюстрация к модели зонда в кровеносном сосуде

Литература

1. *Черноусько Ф.Л., Болотник Н.Н.* Мобильные роботы, управляемые движением внутренних тел // Тр. ИММ УрО РАН. 2010. Т. 16. № 5. С. 213–222.
2. *Иванов А.П., Сахаров А.В.* Динамика твердого тела с подвижными внутренними массами и ротором на шероховатой плоскости // Нелинейная динамика. 2012. Т. 8. № 4. С. 763–772.

3. *Черноусько Ф.Л.* Анализ и оптимизация прямолинейного движения двухмассовой системы // ПММ. 2011. Т. 75. № 5. С. 707–717.
4. *Волкова Л.Ю., Яцун С.Ф.* Управление движением трехмассового робота, перемещающегося в жидкой среде // Нелинейная динамика. 2011. Т. 7. № 4. С. 845–857.
5. *Рамоданов С.М., Тененев В.А.* Движение тела с переменной геометрией масс в безграничной вязкой жидкости // Нелинейная динамика. 2011. Т. 7. № 3. С. 635–647.

УДК 531.24

О «балансирующих» камнях

А.П. Иванов

Московский физико-технический институт (государственный университет)

В последнее десятилетие приобрело популярность следующее небесполезное развлечение: строительство из камней причудливых башенок, сохраняющих равновесие в конфигурациях, на первый взгляд кажущихся невозможными. Примером может служить творчество Микаэля Граба [1] (см. рис. 1). Подобные системы могут сохранять равновесие в течение нескольких часов, разрушаясь лишь под действием ветра. Другим дестабилизирующим фактором могут быть сейсмические толчки.

В докладе обсуждаются условия равновесия произвольной цепочки тяжелых твердых тел, опирающихся друг на друга. Эта задача для случая одинаковых прямоугольных блоков имеет давнюю историю: она рассмотрена более 150 лет назад в учебнике [2]. В дальнейшем она многократно обсуждалась в учебной и научной литературе, включая [3]. Ключом к решению служит разбиение системы на блоки из нескольких элементов, начиная с верхнего.

Отличие камней от параллелепипедов – в их неправильной форме, что обусловливает контакт не по плоской области, а лишь в нескольких точках, обычно в трех. Для базовой модели – треноги на шероховатой плоскости получены условия устойчивости равновесия при наличии колебаний опоры и бокового ветра.

Рис. 1. «Башенка» из камней

Литература

1. http://gravityglue.com/
2. *Phear J. B* Elementary Mechanics. MacMillan, Cambridge, 1850. Pp. 140–141.
3. *Пятницкий Е.С., Трухан Н.М., Ханукаев Ю.И., Яковенко Г.Н.* Сборник задач по аналитической механике. М.: Физматлит, 2002.

УДК 629.78

Механические самоустанавливающиеся замки для сборки и раскрытия составных твердотельных космических зеркал

В.И. Буякас

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Во многих физических и технологических задачах необходимо добиться того, чтобы без дополнительного регулирования сложная механическая система после разборки и повторной сборки возвращалась в исходное состояние с высокой степенью точности в силу своих конструкционных свойств. Подобные задачи, в частности, постоянно возникают при разработке составных зеркал для космических телескопов. Однако аналогичные задачи возникают и в оптике при сборке и регулировании различных систем на оптической скамье, где они рассматривались еще Максвеллом и Кельвином. В их классических работах были предложены приспособления, обеспечивающие высокую точность и высокую повторяемость установки оптических элементов – линз, зеркал, призм, фотопластинок – на оптической скамье. Позднее этот метод объединения элементов конструкции получил в англоязычной литературе название ***kinematic couplings***. Приспособления модернизировались, дорабатывались и использовались для решения различных научных и прикладных задач. Последние десятилетия эти устройства нашли применение в нанотехнологиях. Здесь при высококачественном изготовлении элементов приспособления удается обеспечить микронный и субмикронный уровень точности и повторяемости сборки элементов конструкции,

В настоящей работе рассматривается возможность создания на основе идеи, положеной в основу таких устройств, механических самоустанавливающихся замков для сборки и автоматического раскрытия твердотельных составных зеркал космических телескопов. Приводятся результаты кинематического анализа и физического моделирования предлагаемых устройств.

УДК 532.5.031+517.938.5

Бифуркационный анализ динамики двух вихрей в бозе-эйнштейновском конденсате

С.В. Соколов[1,2], П.Е. Рябов[1,3]

[1]Институт машиноведения им. А. А. Благонравова
[2]Московский физико-технический институт (государственный университет)
[3]Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации

В докладе особое внимание сконцентрировано на актуальной задаче анализа динамики двух вихревых нитей в бозе-эйнштейновском конденсате, заключенном в ловушке (см., например, работу [1] и литературу, указанную в ней). Вихри и вихревые решетки в бозе-эйнштейновском конденсате, например, на ультра-холодных атомах описаны в обзорах [2–4]. Активно изучаются, как с теоретической [5], так и с экспериментальной [6] точки зрения уединенные вихри и система из двух вихрей. Чаще всего вихри в конденсате могут быть описаны как решения уравнения Гросса–Питаевского – трехмерного уравнения в частных производных. При этом наиболее явно может быть определена структура потока сверхтекучей жидкости (конденсата) в окрестности вихревой нити. Существенным недостатком этого подхода является отсутствие аналитических решений уравнения Гросса–Питаевского с необходимыми граничными условиями и, как следствие, мы можем исследовать динамику конденсата в целом и вихрей в частности только с помощью численного решения уравнения в частных производных.

Во многих интересных случаях вихревые нити прямолинейны и параллельны друг другу. При этом задача становится существенно двумерной. В этой ситуации в качестве

альтернативного подхода можно описывать динамику вихрей в конденсате с помощью системы обыкновенных дифференциальных уравнений относительно координат вихревых нитей.

Этот подход хорошо известен в классической гидродинамике [7], где исследуется задача динамики вихревых нитей в идеальной жидкости. Начиная с работ Кирхгофа [8], Гельмгольца [9] и др. были известны простейшие свойства движения вихревых нитей, вихревых пар и полигональных конфигураций вихрей в безграничной идеальной жидкости. Гринхилл [10] впервые рассмотрел движение точечных вихрей внутри круга. Современные работы продолжают исследования классических задач, обобщая их на случай твердых тел, взаимодействующих с вихрями (см., например, [11, 12] и др.). В такой постановке возникают интегрируемые гамильтоновы системы или более общие хаотические динамические системы, при исследовании которых применимы хорошо развитые топологические и качественные методы анализа [13–17].

В докладе представлена задача о движении двух прямолинейных вихревых нитей в бозе-эйнштейновском конденсате, заключенном в цилиндрической ловушке. Нити параллельны образующей кругового цилиндра, поэтому очевидно, что задача двумерна. Основной целью доклада является анализ фазовой топологии этой задачи.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 16-01-00170,16-01-00809,17-01-00846.

Литература

1. *Torres P. J., Kevrekidis P.G., Frantzeskakis D. J., Carretero-Gonzalez R., Schmelcher P., Hall D. S.*, Dynamics of vortex dipoles in confined Bose–Einstein condensates // Phys. Lett. 2011. A, 375 3044–3050.
2. *Pitaevskii L., Stringari S.,* Bose-Einstein Condensation, Oxf. Univ. Press, NY, 2003.
3. *Fetter A. L., Svidzinsky A.A.,* Vortices in a trapped dilute Bose-Einstein condensate, J. Phys.: Condens. Matter 2001. V 13, N 12. P. R135-R194.
4. *Fetter A. L.*, Rotating trapped Bose-Einstein condensates // Rev. Mod. Phys. 2009 81 647.
5. *Middelkamp S., Kevrekidis P.G., Frantzeskakis D. J., Carretero-Gonzalez R., Schmelcher P.,* Bifurcations, stability, and dynamics of multiple matter-wave vortex states, Phys. Rev. 2010. A 82 013646.
6. *Freillich D.V., Bianchi D.M., Kaufman A.M., Langin T.K., Hall D. S.,* Real-time dynamics of single vortex lines and vortex dipoles in a Bose-Einstein condensate, Science 329 (2010) 011603.
7. *Борисов А.В., Мамаев И.С.* Математические методы динамики вихревых структур. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005. 368 с.
8. *Kirchhoff G.R.* Vorlesungen ¨uber Mathematische Physik, Teubner, Leipzig. 1876, v. I.
9. *Helmholtz H.* ¨Uber Integrale hydrodinamischen Gleichungen weiche den Wirbelbewegungen entsprechen // J. rein. angew. Math. 1858, v. 55, s. 25–55., см. также русский перевод: Г. Гельмгольц. Основы вихревой теории. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002.
10. *Greenhill A.G.* Plane vortex motion. Quart // J. Pure Appl. Math. 1877/78, v. 15, n. 58, p. 10–27.
11. *Borisov A.V., Mamaev I. S.* An integrability of the problem on motion of cylinder and vortex in the ideal fluid // Regular and Chaotic Dynamics, vol 8, issue 2, 2003, pp. 163–166.
12. *Sokolov S.V., Ramodanov S.M.* Falling motion of a circular cylinder interacting dynamically with a point vortex // Regular and Chaotic Dynamics, vol 18, issue 1–2, 2013, pp. 184–193.
13. *Болсинов А. В., Фоменко А.Т.,* Интегрируемые гамильтоновы системы. Геометрия, топология, классификация. В 2-х т. Изд.: Ижевск, Удмуртский университет 1999.
14. *Болсинов А. В., Борисов А. В., Мамаев И.С.* Топология и устойчивость интегрируемых систем, УМН, 65 2(392), (2010) 71–132.
15. *Харламов М.П.* Топологический анализ интегрируемых задач динамики твердого тела. Ленинград: Изд. ЛГУ, 1988.
16. *Borisov A.V., Mamaev I. S.,* Topological Analysis of an Integrable System Related to the Rolling of a Ball on a Sphere // Regular and Chaotic Dynamics, vol. 18, issue 4, (2013) pp. 356–371.
17. *Борисов А. В., Рябов П.Е., Соколов С. В.*, Бифуркационный анализ задачи о движении цилиндра и точечного вихря в идеальной жидкости // Матем. Заметки. 2016. Vol. 99, issue 6, pp. 848–854.

УДК 531.36

О вращательном движении спутника с демпфером на эллиптической орбите

А.В. Ноздрин, Н.И. Амелькин

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Изучается влияние внутренней диссипации на вращательное движение спутника, центр масс которого движется по эллиптической орбите. Спутник моделируется системой из двух тел – оболочки и шарового демпфера (модель М.А. Лаврентьева). Предполагается, что при относительных перемещениях демпфера возникает диссипативный момент $\mathbf{M}_d = -\lambda I(\boldsymbol{\Omega} - \boldsymbol{\omega})$, где $\boldsymbol{\omega}$ – вектор абсолютной угловой скорости оболочки, $\boldsymbol{\Omega}$ – вектор абсолютной угловой скорости демпфера, I – момент инерции демпфера, λ – коэффициент демпфирования. Действующий на спутник гравитационный момент определяется формулой: $\mathbf{M}_g = 3k\,\mathbf{R}\times\mathbf{J}\mathbf{R}\big/R^5$, где k – постоянная тяготения, $\mathbf{R}$ – радиус-вектор, соединяющий центр притяжения с центром масс спутника. Вращательное движение спутника описывается системой уравнений

$$\begin{aligned}
&\mathbf{J}^*\dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega}\times\mathbf{J}\boldsymbol{\omega} = \mathbf{M}_g + \lambda I(\boldsymbol{\Omega}-\boldsymbol{\omega})\\
&I(\dot{\boldsymbol{\Omega}} + \boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{\Omega}) = -\lambda I(\boldsymbol{\Omega}-\boldsymbol{\omega})\\
&2\dot{\boldsymbol{\Lambda}} = \boldsymbol{\Lambda}\circ\boldsymbol{\omega}
\end{aligned} \qquad (1)$$

где $\mathbf{J}$ – центральный тензор инерции всего спутника, $\mathbf{J}^* = \mathbf{J} - I\mathbf{E}$, $\mathbf{E}$ – единичная матрица, $\boldsymbol{\Lambda}$ – кватернион единичной нормы, задающий положение базиса главных осей инерции $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$ спутника относительно базиса Кенига $\mathbf{i}_1, \mathbf{i}_2, \mathbf{i}_3$.

Оси базиса Кенига выберем так, чтобы ось $\mathbf{i}_3$ совпадала с нормалью $\mathbf{n}$ к плоскости орбиты, а ось $\mathbf{i}_1$ – с направлением на перигей орбиты. Обозначим через $\mathbf{r} = \mathbf{R}/R$ единичный вектор, сонаправленный с радиус-вектором центра масс спутника, а через ϑ – истинную аномалию – угол между векторами $\mathbf{r}$ и $\mathbf{i}_1$. Угловая скорость орбитального базиса, образованного векторами $\mathbf{r}$, $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{n}\times\mathbf{r}$ и $\mathbf{n}$, определяется выражением: $\boldsymbol{\omega}_0 = \dot{\vartheta}\mathbf{n} = \mathbf{n}c/R^2$, где c – константа интеграла площадей $R^2\dot{\vartheta} = c$. Выбирая истинную аномалию ϑ в качестве независимой переменной и переходя к безразмерным переменным: $\mathbf{U} = \boldsymbol{\omega}/\dot{\vartheta}$ и $\mathbf{V} = \boldsymbol{\Omega}/\dot{\vartheta}$, получим систему

$$\begin{aligned}
&\mathbf{J}^*\mathbf{U}' + \mathbf{U}\times\mathbf{J}\mathbf{U} = (2\mathbf{J}^*\mathbf{U}e\sin\vartheta + 3\mathbf{r}\times\mathbf{J}\mathbf{r})/(1+e\cos\vartheta) + \mu I(\mathbf{V}-\mathbf{U})/(1+e\cos\vartheta)^2,\\
&\mathbf{V}' + \mathbf{U}\times\mathbf{V} = 2\mathbf{V}e\sin\vartheta/(1+e\cos\vartheta) - \mu(\mathbf{V}-\mathbf{U})/(1+e\cos\vartheta)^2,\\
&2\boldsymbol{\Lambda}' = \boldsymbol{\Lambda}\circ\mathbf{U},
\end{aligned} \qquad (2)$$

где $\mu = \lambda p^2/c$ – безразмерный коэффициент демпфирования, p – параметр орбиты, e – эксцентриситет, штрихом обозначена производная по истинной аномалии, а все векторы заданы своими проекциями на оси базиса $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$.

Уравнения (2) могут быть использованы для численного исследования эволюции вращательного движения спутника. Для исследования предельных вращений спутника предпочтительны уравнения, описывающие движение относительно орбитального базиса. Для динамически симметричного спутника эти уравнения имеют вид

$$\mathbf{e}' = \mathbf{u} \times \mathbf{e}$$

$$(A-I)(\mathbf{u}' + \mathbf{n} \times \mathbf{u}) + (C-A)[((\mathbf{u}' + \mathbf{n} \times \mathbf{u}) \cdot \mathbf{e})\mathbf{e} + ((\mathbf{n}+\mathbf{u}) \cdot \mathbf{e})(\mathbf{n}+\mathbf{u}) \times \mathbf{e}] =$$

$$= \frac{2e\sin\vartheta}{1+e\cos\vartheta}\big((A-I)(\mathbf{n}+\mathbf{u}) + (C-A)[(\mathbf{n}+\mathbf{u}) \cdot \mathbf{e}]\mathbf{e}\big) + \frac{\mu(\mathbf{v}-\mathbf{u})}{(1+e\cos\vartheta)^2} + \frac{3(A-C)(\mathbf{r} \cdot \mathbf{e})(\mathbf{e} \times \mathbf{r})}{1+e\cos\vartheta}, \quad (3)$$

$$\mathbf{v}' + \mathbf{n} \times \mathbf{v} = \frac{2e\sin\vartheta}{1+e\cos\vartheta}(\mathbf{n}+\mathbf{v}) - \frac{\mu(\mathbf{v}-\mathbf{u})}{(1+e\cos\vartheta)^2},$$

где $\mathbf{e}$ – ось симметрии, $\mathbf{u} = (\boldsymbol{\omega} - \boldsymbol{\omega}_0)/\omega_0$ и $\mathbf{v} = (\boldsymbol{\Omega} - \boldsymbol{\omega}_0)/\omega_0$ – приведенные угловые скорости оболочки и демпфера относительно орбитального базиса.

Литература

1. *Белецкий В.В.* Движение спутника относительно центра масс в гравитационном поле. М.: Изд-во МГУ, 1975. 308 с.
2. *Маркеев А.П.* Линейные гамильтоновы системы и некоторые задачи об устойчивости движения спутника относительно центра масс. М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2009. 396 с.
3. *Амелькин Н.И., Холощак В.В.* Об устойчивости стационарных вращений спутника с внутренним демпфированием в центральном гравитационном поле // ПММ. 2017. Т. 81. Вып. 2. С. 123 –136.

УДК 531.011

О формальной устойчивости положения равновесия системы Гамильтона

А.Б. Батхин

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН
Московский физико-технический институт (государственный университет)

Рассматривается система Гамильтона с n степенями свободы, $n \geq 3$, которая имеет положение равновесия в начале фазового пространства. Тогда функция Гамильтона $H(Z)$ вблизи нуля может быть разложена в ряд:

$$H(Z) = \sum_{i=2}^{\infty} H_i(Z), \quad (1)$$

где $H_i(Z)$ – однородный многочлен степени i от фазовых переменных $Z = (X, Y)$. Рассмотрим устойчивость положения равновесия $Z = 0$ при следующих условиях:

1) квадратичная форма $H_2(Z)$ является невырожденной и знакопеременной;

2) функция Гамильтона $H(Z)$ гладко зависит от вектора параметров P размерности m.

В силу большой размерности и сделанных выше предположений в положении равновесия возможна лишь формальная устойчивость, предложенная Дж. Биркгофом и разработанная Ю. Мозером и А.Д. Брюно.

Определение 1. Положение равновесия системы Гамильтона называется формально устойчивым, если существует (возможно расходящийся) степенной ряд $G(Z)$, являющийся формальным положительно определённым первым интегралом: $\{H,G\} = 0$. Здесь $\{\cdot, \cdot\}$ – скобка Пуассона.

Предлагается схема исследования формальной устойчивости положения равновесия при сделанных выше предположениях. Эта схема существенно использует

полиномиальное представление так называемого резонансного множества вещественного многочлена [1] и

гамильтонову нормальную форму вблизи положения равновесия.

Определение 2. Резонансным множеством $R_q(f_n)$ многочлена $f_n(x)$ назовём множество всех точек P в пространстве его коэффициентов Π, в которых $f_n(x)$ имеет, по крайней мере, пару соизмеримых корней:

$$R_q(f_n) = \left\{ P \in \Pi : \exists i, j = 1, \ldots, n, i \neq j, t_i / t_j = q \neq 0 \right\}, \quad (2)$$

где $t_i, i = 1, \ldots, n$ – корни многочлена $f_n(x)$ степени n.

Резонансное множество $R_q(f_n)$ является аналогом дискриминантного множества $D(f_n)$ [2]. Его структура полностью определяется набором субдискриминантов многочлена $f_n(x)$, а его полиномиальная параметризация вычисляется с помощью эффективных алгоритмов [3].

Предлагается следующая пошаговая схема исследования формальной устойчивости положения равновесия.

На первом шаге вычисляется множество устойчивости $S \subset \Pi$ линеаризованной системы Гамильтона:

$$\dot{Z} = JA(P)Z, A(P) = \frac{1}{2}\mathrm{Hess}H_2(Z). \quad (3)$$

Здесь J – симплектическая единица.

Граница множества S состоит из участков двух резонансных множеств (2) характеристического многочлена $f(\lambda)$ матрицы $JA(P)$: множества $R_0(f)$ для $q = 0$ (случай нулевых корней) и множества $R_1(f)$ для $q = 1$ (случай кратных корней). Алгоритм вычисления множества устойчивости S описан в [4].

На втором шаге вычисляются резонансные множества (2) многочлена $f(\lambda)$ для $q = 2$ и $q = 3$. Эти множества делят множество устойчивости S на области W_j, в которых может существовать резонанс между собственными частотами порядка 4 и выше. В каждой из областей W_j гамильтониан (1) может быть приведён к нормальной форме 4-го порядка:

$$\tilde{H}(\rho) = \tilde{H}_2(\rho) + \tilde{H}_4(\rho),$$

где $\tilde{H}_2(\rho) = (\Lambda, \rho)$, $\tilde{H}_4(\rho) = (B\rho, \rho)$, ρ – вектор переменных действия, Λ – вектор собственных частот линеаризованной системы (3), а B – квадратная симметричная матрица.

Утверждение 1. Если полуалгебраическая система $\tilde{H}_2(\rho) = \tilde{H}_4(\rho) = 0, \rho > 0,$ не имеет решений, то согласно теореме Брюно [5], положение равновесия $Z = 0$ является формально устойчивым.

Показана работа предложенной схемы исследования на примере некоторой механической модели с гироскопической стабилизацией.

Заметим, что вычисление резонансного множества $R_q(f)$ характеристического многочлена $f(\lambda)$ и нормальной формы функции Гамильтона (1) может быть выполнено с помощью алгоритмов полиномиальной компьютерной алгебры, которые эффективно реализуются в большинстве современных систем символических вычислений.

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований IV.1.1 ОМН РАН.

Литература

1. *Батхин А.Б.* Структура резонансного множества вещественного многочлена: препринт ИПМ им. М. В. Келдыша. 2016. № 29. 23 с. DOI:10.20948/prepr-2016–29.
2. *Батхин А.Б.* Параметризация дискриминантного множества вещественного многочлена // Программирование. 2016. Т. 42, № 2. С. 65–76.
3. *Батхин А.Б., Брюно А.Д., Варин В.П.* Множества устойчивости многопараметрических

гамильтоновых систем // ПММ. 2012. Т. 76, № 1. С. 80–133.
4. *Батхин А.Б.* Вычисление обобщённого дискриминанта вещественного многочлена: препринт ИПМ им. М. В. Келдыша. 2017. № 88. 40 с. DOI:10.20948/prepr-2017–88.
5. *Брюно А. Д.* О формальной устойчивости систем Гамильтона // Мат. заметки. 1967. Т. I, № 3. С. 325–330.

Секция физики моря

УДК 551.462.6

Кинематика раскола Мадагаскар – Сейшельского континентального блока

И.М. Кутюхин

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Одним из актуальных научных направлений изучения Мирового океана является выяснение строения и стадийности развития дна его индоокеанского сектора прежде всего в контексте раскола гондванского суперматерика.

Северо-западная часть Индийского океана занимает огромный район. В ее пределах остров Мадагаскар являлся важнейшим континентальным звеном, связующим Индию и Африку в составе Гондваны. Также в этом районе есть так называемый Сейшельский континентальный блок (в дальнейшем для краткости изложения – Сейшелы) – элемент континентальной коры. При этом конкретное местоположение этого участка коры перед расколом Гондваны не является точно определенным и остается предметом дискуссий. Положение Сейшел в ансамбле гондванских континентальных фрагментов анализировалось во многих палеогеодинамических реконструкциях. Согласно различным исследованиям, Сейшелы перед расколом Гондваны занимали положение вблизи северной оконечности острова Мадагаскар в интервале от позиции в районе северо-востока Мадагаскара до позиции в районе западного побережья. Такая разность положения превышает 100 км.

В этом исследовании предпринята попытка детального комплексного анализа имеющихся геолого-геофизических данных для восстановления наиболее вероятного положения Сейшел относительно Мадагаскара.

В работе [3] была предложена компьютерная методика для наилучшего совмещения изобат. Совмещение осуществлялось способом проб и ошибок, путем минимизации углового несовпадения, измеряемого вдоль эйлеровых широт. Методика иллюстрировала принцип, согласно которому наилучшее совмещение может производиться для любых контуров, которые, как установлено или как предполагается, в прошлом составляли единый контур. Реализуя принцип наилучшего совмещения, удается добиваться воссоединения и восстановления первичной непрерывности любых контуров, включая изохронны, изобаты, изогипсы и др.

Многочисленные опробования стыкуемости различных участков разных и одноименных изобат показали, что наиболее подходящими для целей палеогеодинамического анализа оказались участки изобат в интервале 0.5–4 км, которые соответствуют наиболее крутому участку склонов и обладающих наименьшей мощностью осадков (или даже полностью лишенный их). Расчеты эйлеровых полюсов и углов поворота делались по оригинальным программам лаборатории геофизики и тектоники дна Мирового океана Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, принципы расчетов которых изложены в работе.

Современные склоны вдоль анализируемых профилей в интервале глубин 0.5–3.5 км характеризуются углами наклона от 4º до 26º и в среднем составляют 12º. Это выше порогового значения 3º, превышение которого делает возможным [1] преодоление силы сцепления между слоями осадков и лавинообразный срыв их вниз по склону к континентальному подножью. Последнее приводит к невозможности накопления на склонах значительных мощностей осадочных масс. Таким образом, анализируемые участки склона не обладают значительным количеством осадков, что позволяет рассматривать современную поверхность склона как конформную первичному континентальному склону и провести палеогеодинамическую реконструкцию путем схлопывания изобат встречных склонов Мадагаскара и Сейшел по электронной карте.

Если раскол континентальной коры и формирование океанической коры имели место, то конфигурация склона при малых мощностях осадков должна соответствовать конфигурации трещины раскола континентальной коры, как это предполагалось при совмещении Южной Америки и Африки [3], а также при совмещении южных континентов.

С целью проверки данного предположения был осуществлён анализ конфигурации встречных (конжугейтных) склонов Сейшел и Мадагаскара по различным изобатам с шагом 20 м.

В качестве количественного критерия наиболее оптимального совмещения рассматривался минимум среднеквадратичного отклонения координат изобат в совмещаемых (конжугейтных) точках. Качественно близкий результат получался, если критерием наиболее оптимального совмещения брать минимум среднеквадратичного отклонения координат изогипс в совмещаемых точках, отнесенного к общей длине совмещенных частей изобат. Наилучший результат совмещения получен для изобаты 1040 м (северный склон Мадагаскара) и 880 м (южный склон Сейшел).

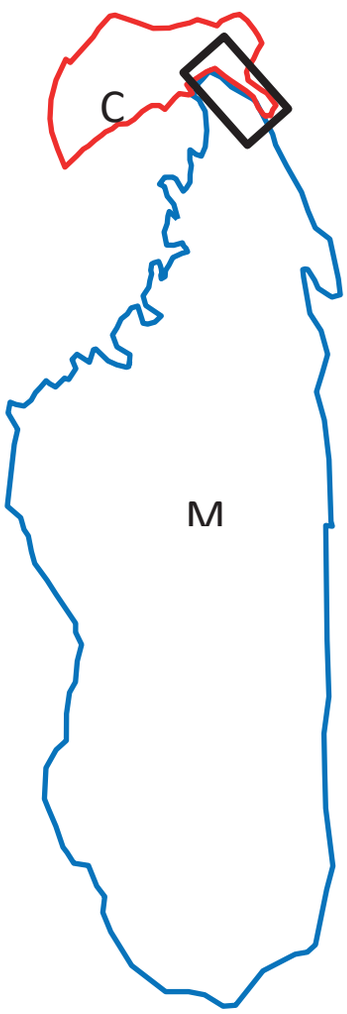


Рис. 1. Палеогединамическая реконструкция смыкания встречных склонов Мадагаскара (М) и Сейшел (С), рамкой выделен район исследований

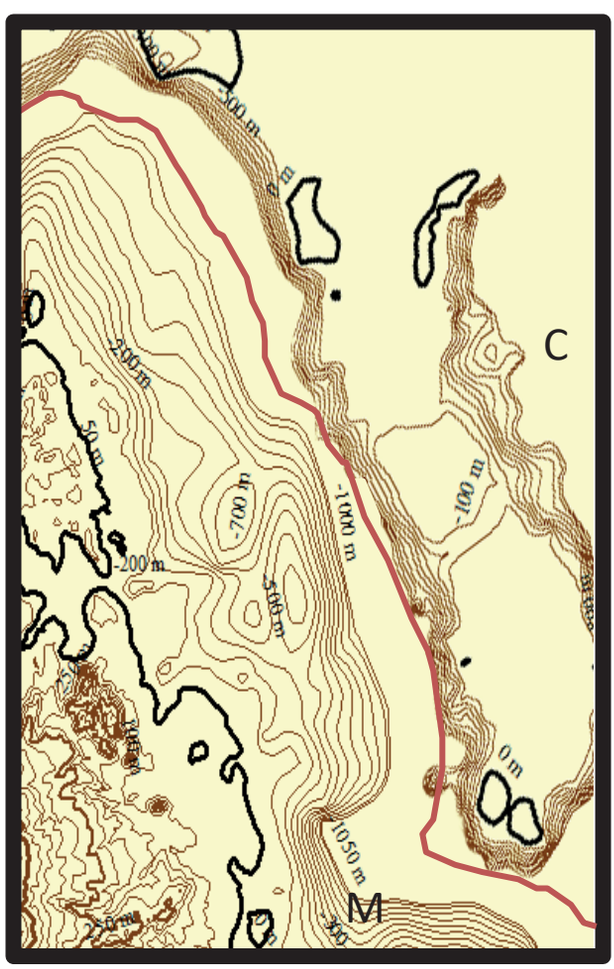


Рис. 2. Восстановленная на основе палеогеодинамической реконструкции палеобатиметрия Мадагаскар-Сейшельской области, показано положение профилей палеорельефа

Литература

1. *Жмур В.В., Сапов Д.А., Нечаев И.Д.* [*и др.*]. Интенсивные гравитационные течения в придонном слое океана // Изв. АН. Сер. Физическая. 2002. Т.66, № 12. С. 1721–1726.
2. *Шрейдер А.А.* Геомагнитные исследования Индийского океана. М.: Наука, 2001. 319 с.
3. *Bullard E., Everett J., Smith A.* The fit of continents around Atlantic. Symphosium on continental drift // Phil. Trans. Roy. Soc. London. 1965. V. 258A. P. 41–51.

УДК 51.37

Восстановление данных поверхностной температуры при помощи вариационного алгоритма фильтрации

В.С. Кочергин, С.В. Кочергин

Морской гидрофизический институт РАН

Спутниковые данные дают возможность получать оперативную информацию о динамике пространственных структур и значениях характеристик поверхности океана. В оптическом диапазоне – это концентрация рассеивающей взвеси, в других диапазонах возможно воспроизведение поверхностной температуры и параметров, связанных с волнением моря. В пространственно-временной структуре спутниковых данных измерений чаще всего имеются пропуски. Поэтому задача восстановления данных для этих промежутков времени является важной и актуальной. В данной работе предлагается решать эту задачу на основе вариационного алгоритма фильтрации линейных систем уравнений [1]. Ранее подобный алгоритм применялся для восстановления амплитуд мод береговых захваченных волн [2], а также при решении различных океанологических задач, связанных с представлением полей в виде разложения по некоторому ортогональному базису [3]. При численной реализации алгоритма фильтрации используется поиск экстремума квадратичного функционала специального вида и преобразование исходной системы при помощи плоских вращений. Уравнения новой системы сортируются по рангу и неинформативные удаляются из нее. Таким образом, алгоритм фильтрации основан на плоском вращении системы при помощи максимизации квадратичного функционала, характеризующего соотношения коэффициентов системы и ее правых частей. При этом используется априорная информация о возможных максимальных значениях решения. В результате работы алгоритма получается эквивалентная система, в которой уравнения выстроены по рангу информативности.

В качестве данных изменений был взят временной ряд поверхностной температуры для одной и той же точки Черного моря. Восстановление данных измерений происходило на временном интервале один год. Было взято по семь амплитуд мод для синуса и косинуса в ортогональном разложении. В результате работы процедуры фильтрации была построена система уравнений для коэффициентов разложения с учетом всей доступной информации. Решение такой системы позволило определить функцию, хорошо согласованную с данными измерений и определяющую значения для моментов времени, где информация о поле температуры отсутствует.

Численные эксперименты показали, что выбор интервала времени, на котором решается задача восстановления, зависит от количества имеющейся информации, количества мод разложения и требуемой точности восстановления. Проведенные расчеты показали надежную работу вариационного алгоритма фильтрации данных измерений, что позволило восстановить пропущенные данные в поверхностной температуре в данной точке.

Литература

1. *Страхов В.Н.* Метод фильтрации систем линейных алгебраических уравнений – основа для решения линейных задач гравиметрии и магнитометрии // Докл. АН СССР. 1991. 320, №3. С. 595–599.

2. *Кочергин С.В., Янковский А.Е.* Применение алгоритма фильтрации данных при восстановлении структуры захваченных волн на шельфе Крыма // Морской гидрофизический журнал. 1995, № 5. С. 62–65.
3. *Еремеев В.Н., Кочергин В.П., Кочергин С.В., Скляр С.Н.* Математическое моделирование гидродинамики глубоководных бассейнов. Севастополь: Экоси-Гидрофизика, 2002. 238 с.

УДК 532.685

Формирование грунтовых вод в области береговых примыканий Арктических регионов

Ю.В. Фомин

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

Арктические регионы характерны своими суровыми природно-климатическими условиями. Помимо этого, наличие вечной мерзлоты существенно усложняет проектирование морских трубопроводов, в особенности в зонах берегового примыкания. Основные инженерно-геологические проблемы, которые могут возникнуть при выборе зон берегового примыкания трубопроводов, описаны в различных работах, например [4,8]. Среди приведенных в литературе проблем особую роль играет таяние и просадка мерзлых грунтов в окрестности береговых примыканий морских трубопроводов в Арктике. Данное явление потенциально может привести к повреждению трубопровода в береговой зоне. Избыточные потоки тепла в береговой зоне связаны с воздействием на пористый грунт морской воды. В этой связи изучение механизмов интрузии или фильтрации морской воды в водоносный горизонт берега является задачей крайне острой и актуальной.

При вариациях уровня воды в море, возникает горизонтальная компонента градиента давления, которая приводит к фильтрации морской воды из моря в проницаемый грунт и обратно. Однако из-за того, что просочившаяся вода не успевает разгрузиться обратно в море за период колебания уровня воды, а именно за 12 часов 25 минут, возникает подъем среднего уровня грунтовой воды в сравнении с средним уровнем воды в море. Это так называемый "pumping-effect", или эффект накачки.

На данный момент существует большое количество работ, которые посвящены исследованию приливов на уровень грунтовых вод, например, [1–4, 6, 7, 9]. В указанных работах рассматриваются модели с вертикальным или плоским наклонным берегом, однако эти модели несправедливы в ряде случаев.

В предлагаемой работе изучается пампинг-эффект прибрежной зоны моря для произвольного профиля берега в двумерной постановке. Показано, что для данной модели, как и в случае плоского наклонного берега, пампинг-эффект можно разделить на две составляющие. Составляющая, связанная с нелинейностью процесса, для нее предлагается название «базовый пампинг-эффект», и составляющая связанная с профилем дна, для нее предлагается название «профильный пампинг-эффект». Приводятся примеры, для которых профильный превалирует над базовым пампинг-эффектом. В работе установлено, что в безразмерном виде линейная составляющая профильного пампинга не зависит от амплитуды колебания воды. Кроме того, описываются ограничения на параметры задачи, при которых рассматриваемая теории и выводы будут справедливы.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ Ваш грант № 17-07-01464.

Литература

1. *Жмур В.В., Марченко А.В., Фомин Ю.В.* Нестационарная фильтрация морских вод в водоносные слои прибрежной зоны моря // Водные ресурсы. (в печати)
2. *Зырянов В.Н., Хубларян М.Г.* Пампинг-эффект в теории нелинейных процессов типа уравнения теплопроводности и его приложение в геофизике // Доклады академии наук. 2006. Т. 408, вып. 4. С. 535–538.

3. *Зырянов В.Н., Фролов А.П., Хубларян М.Г.* Некоторые нелинейные режимы фильтрации грунтовых вод // Известия Российской академии наук, механика жидкости и газа, 2009. вып. 5. С. 109.
4. *Неизвестнов Я.В., Куринный Н.А., Кондратенко А.В., Нарышкин Г.Д., Аветисов Г.П.* Инженерно-геологические условия строительства газопроводов и сооружений зон береговых примыканий на западно- арктическом шельфе России // Инженерно-геологические условия разработки полезных ископаемых морского дна. СПб.: 1996. С.5–14.
5. *Хубларян, М. Г., Фролов А. П., Юшманов И.О.* Интрузия морских вод в прибрежные водоносные горизонты // Водные ресурсы. 2008. Т. 35, вып. 3. С. 288–301.
6. *Bear J., Cheng A.H.-D.,Sorek S., Ourar D., Herrar I*. Seawater intrusion in coastal aquifers - Concepts, Methods // Kluwer Academic publisher. 1999.
7. *Li L., Barry D.A., Stagnitti F., Parlange J.Y., Jeng D.S*. Beach water table fluctuations due to spring-neap tides: moving boundary effects // Advance in water resources. 2000. V. 23. P. 817–824.
8. Ove T. Gudmestad, Sveinung Loset, Alexander I.Alhimenko, Karl N.Shkhinek, Alf Torum and Arnor Jensen Engineering aspects re- lated to arctic offshore developments. St.Petersbirg: Publisher "LAN", 2007. 256 pp,il.
9. *Raubenheimer B. Guza R.T.* Tidal water table fluctuations in a sandy ocean beach //Water resources research. 1999. V. 35. N 8. P. 2313–2320.

УДК 551.461.25

Особенности непериодических колебаний уровня в морях российской Арктики

М.Е. Куликов[1,2], И.П. Медведев[1,2,3], А.Т. Кондрин[1]

[1]МГУ им. М. В. Ломоносова
[2]Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
[3]Институт прикладной геофизики им. академика Е.К. Фёдорова

В данной работе рассматриваются непериодические (остаточные) колебания уровня моря, сформированные под влиянием метеорологических факторов. Основное внимание уделяется сезонной изменчивости характеристик этих колебаний.

Непериодические колебания уровня моря в синоптическом масштабе времени выражены в виде сгонно-нагонных явлений, связанных с воздействием приземного ветра, изменениями атмосферного давления и прохождением барических образований [1]. Их вклад в суммарные колебания уровня в некоторых районах Арктики сопоставим и даже превышает вклад приливо-отливных явлений. Этим метеорологическим колебаниям уровня моря, так же как и приливам, свойственна сезонная изменчивость, связанная с перестройкой барических полей в атмосфере и характером ледового покрова акваторий морей Арктики [3].

Использованные в настоящем исследовании данные представляют собой массив ежечасных наблюдений за уровнем моря на шести станциях в Белом, Лаптевых и Чукотском морях. Временное покрытие для беломорских станций включает относительно непрерывные ряды с 2004 по 2015 годы. Для станций восточного сектора Арктики (море Лаптевых и Чукотское) имеется максимальный ряд с 1981 по 2005 годы для станции Тикси.

Чтобы получить непериодический ряд, прежде всего исключались приливы, при помощи гармонического анализа методом наименьших квадратов [2]. Затем применялся спектральный анализ, позволяющий оценить распределение энергии колебаний уровня моря по частотам (рис. 1). Ввиду гидрометеорологических особенностей окраинных морей Северного-Ледовитого океана отдельно рассчитывался спектр летних колебаний уровня моря – в безледный период, и зимних – в период развития ледового покрова. Для Белого моря, ввиду климатических особенностей, отдельно рассчитывались полугодовые спектры в теплый и холодный периоды [3].

Спектральный анализ записей показал увеличение дисперсии непериодических колебаний уровня Белого моря в зимний период по сравнению с летним. Наиболее ярко это превышение проявляется в синоптическом диапазоне частот, что связано с динамической

активностью атмосферы в холодный период. В морях восточного сектора Арктики, напротив, в синоптическом и высокочастотном диапазоне изменчивости непериодического уровня летний спектр существенно преобладает над зимним, что вызвано влиянием ледового покрова.

В работе также показаны основные различия в сезонной изменчивости сгонно-нагонных или экстремальных колебаний уровня моря между регионами исследования: для Белого моря (Соловки) они сильнее выражены в зимний период (рис. 2а), в то время как для морей восточного сектора российской Арктики (Тикси) они чаще происходят летом (рис. 2б). В результате анализ сезонной изменчивости непериодических колебаний уровня показал их сезонные и региональные различия в арктических морях России, что отражает их климатические особенности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (гранты № 14-50-00095 и 14-37-00038) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 17-05-41144).

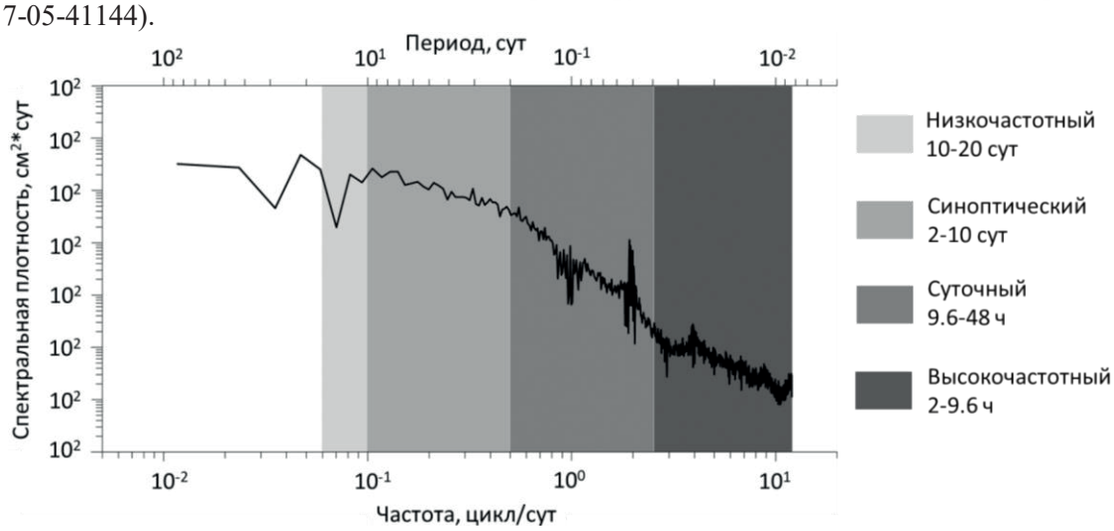


Рис. 1. Спектр остаточных колебаний уровня моря и частотные диапазоны, в которых рассчитывалась дисперсия

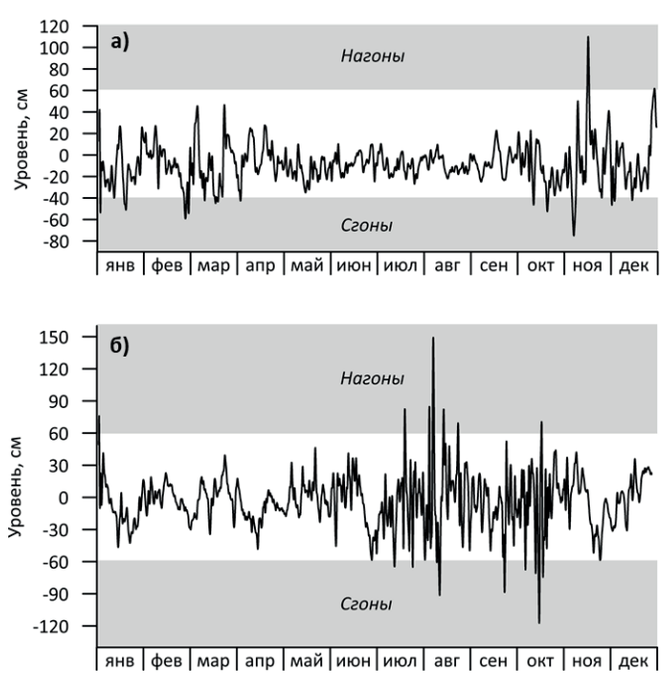


Рис. 2. Сгонно-нагонные (экстремальные) колебания уровня моря для Соловков (а) и Тикси (б)

Литература

1. Советская Арктика. Моря и острова Северного Ледовитого океана / под ред. И.П. Герасимова. М.: Наука, 1970. 525 с.
2. *Кондрин А.Т.* Методы гармонического анализа приливов // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 2008. № 5. С. 26–30.
3. *Куликов М.Е., Кондрин А.Т., Куликов Е.А., Медведев И.П.* Сезонная и многолетняя изменчивость приливных и сгонно-нагонных колебаний уровня морей российской Арктики // Комплексные исследования Мирового океана // Материалы II Всероссийской научной конференции молодых ученых. 2017. С. 140–143.

УДК 551.468

Термохалинная структура вод в Балтийском проливе и её связь с режимообразующими факторами

Н.Р. Хайруллин[2], Р. З. Мухаметьянов[2], Д. С. Ходаев[2], А.И. Висич[2], Н.Б. Степанова[1,2], Б.В. Чубаренко[2]

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2]Институт океанологии им П.П. Ширшова РАН

В ходе работ прибрежной экспедиции было изучено взаимодействие вод Калининградского залива и вод Балтийского моря в районе Балтийского пролива (шириной 400 метров, глубиной – 10–12 м). Динамика вод данного района характеризуется сменой гидрологических режимов: затоков морских вод в акваторию залива и формирование плюмов заливных вод в морской акватории. В ситуации затока, морские воды блокируют распространение заливных вод в сторону моря. При дальнейшем развитии ситуации затока морская вода занимает весь объем канала. В обратном случае заливная вода распространяется в сторону моря по поверхности пролива и наблюдается структура по типу эстуария.

С 5 по 9 августа 2017 года проводился мониторинг пролива, включающий в себя измерение солености воды, а также наблюдение за направлением движения поверхностного слоя вод. Сбор данных производился CTD-зондом Idronaut.

Измерения производились ежедневно по следующим разрезам: по фарватеру вдоль всего пролива и поперечные разрезы в проливе.

В настоящих тезисах представлены общие результаты проведенной экспедиции.

В период с 5 по 6 августа в Балтийском проливе наблюдалась однослойная структура вод с характерными для морской воды значениями солености 6–7 psu, с 8 по 9 августа – двуслойная структура с характеристиками верхнего слоя от 5 до 6 psu, нижнего от 6 до7 psu.

В рассматриваемый период наблюдалась смена гидрологических режимов: заток морских вод в акваторию Калининградского залива, продолжавшийся с 5 по 6 августа, сменился ситуацией стока вод из залива, которая наблюдалась с 8 по 9 августа и привела к формированию нескольких последовательных плюмов заливных вод в прилегающей акватории моря. Изменение режима водообмена между заливом и морем 7 августа соответствовало смене направления ветра с западного на восточный.

Таким образом в результате экспедиции удалось зафиксировать как ситуации затока морских вод в акваторию Калининградского залива, так и вытекание заливных вод через пролив в сторону Балтийского моря. В дни наблюдений (08.08 – 09.08) вытекающая заливная вода занимала лишь поверхностный (2 м) слой Балтийского пролива (Рис. 1), глубже по-прежнему располагалась морская вода, т.е. наблюдалась вертикальная структура вод эстуарного типа. Сток вод был не настолько активный, чтобы вытеснить всю морскую воду из ложа Балтийского пролива.

Было замечено, что в рассматриваемый период, когда струя вытекающей заливной воды не занимает всю ширину Балтийского пролива, она «жмется» к северному молу

(Рис. 1), что может объясняться действием локального ветра восточного направления. Для подтверждения необходимы дальнейшие наблюдения, в частности при ситуации стока, реализующейся при северо-восточном ветре.

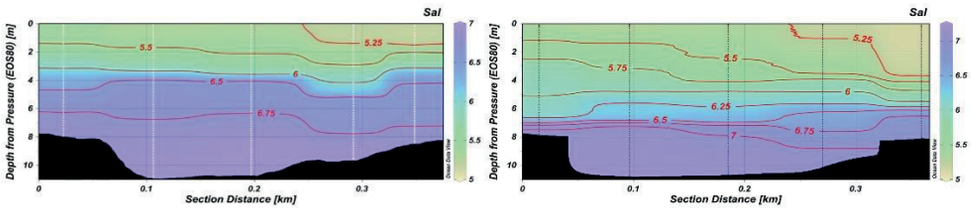


Рис. 1. Поперечный разрез Балтийского канала в поле солености: а) 8 августа б) 9 августа

Сбор данных и обработка результатов произведена при поддержке гранта РГО-РФФИ 17-05-41029. Подготовка оборудования, методическое сопровождение и постановка задачи были проведены в рамках темы № 0149-2014-0017 государственного задания ИО РАН.

УДК 551.468

Двухслойная структура вод и некоторые особенности водообмена в Балтийском проливе

А.И. Висич[2], Н.Б. Степанова[1,2], Р.З. Мухаметьянов[2], Н.Р. Хайруллин[2], Д.С. Ходаев[2], Б.В. Чубаренко[2], А.Н. Бабаков[2], А.Н. Граве[2]

[1] Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
[2] Московский физико-технический институт (государственный университет)

Цель исследования – выявить закономерности водной динамики в Балтийском проливе и изучить термохалинную структуру вод.

В ходе работ прибрежной экспедиции в период с 5 по 9 августа 2017 г. было выявлено два ключевых явления, определяющих водообмен в Балтийском проливе: заток морских вод в акваторию залива и обратная ситуация – вынос лагунных вод в море. В первом случае воды, нагоняемые с моря, вытесняют заливные по всей глубине канала. Во втором случае заливные воды выходят через пролив в морскую акваторию, наползая поверх более солёных и тяжёлых морских вод.

Гидрологические измерения проводились при помощи CTD-зонда Idronaut с борта моторной лодки. Для качественного изучения движения вод в проливе и прилегающих акваториях использовались автономные поплавки-дрифтеры с GPS-датчиками и подводными парусами регулируемой глубины (авторская работа сотрудников АО ИО РАН А.Н. Граве и А.Н. Бабакова). В течение всего периода измерений проводились ежедневные визуальные наблюдения за состоянием поверхностного слоя воды в проливе. Также использовались метеоданные и сведения об изменении уровня моря в проливе.

Профиль солености, полученный при выполнении разреза со стороны моря в сторону залива во время затекания морских вод (5 и 6 августа), показал однородные по всей толщине воды с солёностью 6,8–7 епс, занимающие пространство в сторону залива на длину 2.3 км от юго-восточной оконечности пролива (рис. 1).

В случае образования плюма (8 и 9 августа) в проливе наблюдалась двухслойная структура в поле солёности: морские воды, характеризуемые солёностью 6–7 епс, расположились в придонном слое, а заливные воды (5–6 епс) – в поверхностном слое (рис. 2).

Использование дрифтеров (5 м заглубления, 08.08.2017 г. и 3 м заглубления, 09.08.17 г.) позволило качественно показать динамику вод в период наблюдения плюма (рис. 3).

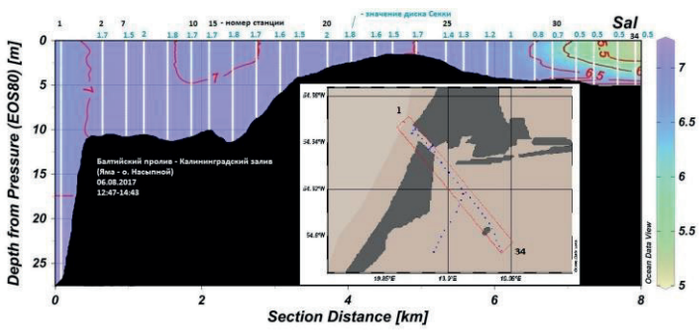


Рис. 1. Продольный разрез от Балтийского пролива в направлении о. Насыпной в поле солености в направлении из моря в залив 6 августа 2017 г

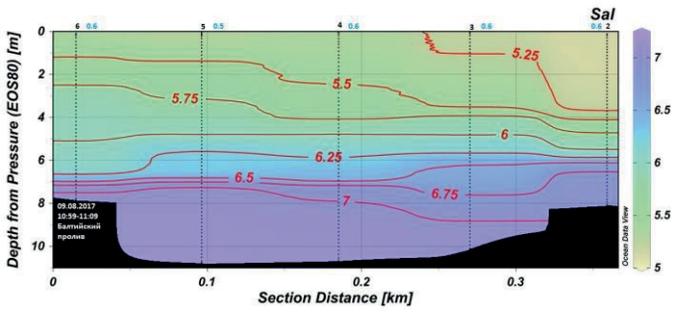
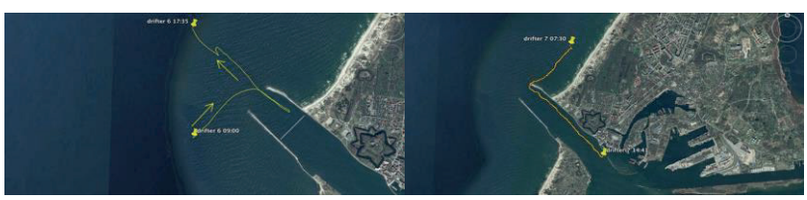


Рис. 2. Поперечный разрез Балтийского канала в поле солености 9 августа



а) б)

Рис. 3. Визуализация движения дрифтера из акватории моря в створ Балтийского пролива. а) 08.08.17 г., дрифтер 5-м заглубления, б) 09.08.17 г., дрифтер 3-м заглубления

Сбор данных и обработка результатов произведена при поддержке РГО-РФФИ 17-05-41029. Подготовка оборудования, методическое сопровождение и постановка задачи были проведены в рамках темы № 0149-2014-0017 государственного задания ИО РАН.

УДК 551.468

Термохалинная структура вод в акватории Балтийского моря вблизи Балтийского пролива

Д.С. Ходаев[2], А.И. Висич[2], Р.З. Мухаметьянов[2], Н.Р. Хайруллин[2], Н.Б. Степанова[1,2], Б.В. Чубаренко[2], А.Н. Бабаков[2], А.Н. Граве [2]

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2]Институт океанологии им П.П. Ширшова РАН

Во время прибрежной практики было изучено взаимодействие вод Балтийского моря и Калининградского залива в Балтийском проливе и в прилегающих акваториях Балтийского моря и Калининградского залива. Данное взаимодействие характеризуется двумя режимами: втекание вод из моря в пролив и обратный процесс. В результате вытекания воды из залива в море может образовываться плюм (характерный поперечный

размер – несколько километров) – явление наползания смешанных или более пресных вод из Калининградского залива на более солёные воды Балтийского моря. При формировании плюма могут возникать его более малые аналоги – перья. Их характерный размер составляет несколько сотен метров. Изучение данного явления проводилось с помощью CTD-зонда Idranaut. Исследования были совершены в период с 8 по 9 августа 2017 года. В течение всего времени их проведения был осуществлен мониторинг метеоситуации в районе г. Балтийск, а также уровня воды в проливе.

Измерения были совершены поперёк плюма и перьев. Все данные были собраны с использованием двух методик. Первая подразумевает под собой станционный тип исследования – зондирование (сбор данных в одной точке по всей глубине через каждые 100–300 метров). Вторая – буксировка зонда в поверхностном слое (10–20 см) вод с шагом данных 30–50 сантиметров. Буксировка проводится таким образом, чтобы она совпала с отрезком, соединяющим станции. При станционных измерениях были также собраны данные о прозрачности воды при помощи диска Секки.

В ходе экспедиции в том числе был сделан разрез и проведены буксировки поперёк плюма и нескольких его перьев. В настоящих тезизах представлены результаты этих исследований.

8 августа в прилегающей к проливу акватории моря наблюдались только перья. Это был первый этап переходного процесса (он заключается в смене затока вод в акваторию залива на выток). Затем 9 августа наблюдалось формирование плюма. Как выяснилось, он состоял из смешанных вод. Под смешанными водами подразумеваются воды с солёностью от 4,5–5 епс до 6,6–7 епс. (Вода Балтийского моря имеет солёность 7 епс и выше; заливные воды обладают солёностью ниже 4,5 епс.)

В результате экспедиции было зафиксировано, что плюм возник при действии умеренного юго-восточного ветра, в то время как ситуация затока воды в залив наблюдалась при северо-западных ветрах.

Более того, удалось зафиксировать возникновение более сложного явления: наползание плюма пресных вод на воды плюма, сформированного из смешанных, солоноватых вод прошедшего затока (рис. 1).

С помощью собранных данных была также сделана оценка скорости смещения боковой границы плюма. За 80 минут она преодолела порядка 530 метров, что соответствует скорости около 5–6 метров за минуту. Таким образом плюм является динамичным объектом, который невозможно изучать как квазистационарное явление.

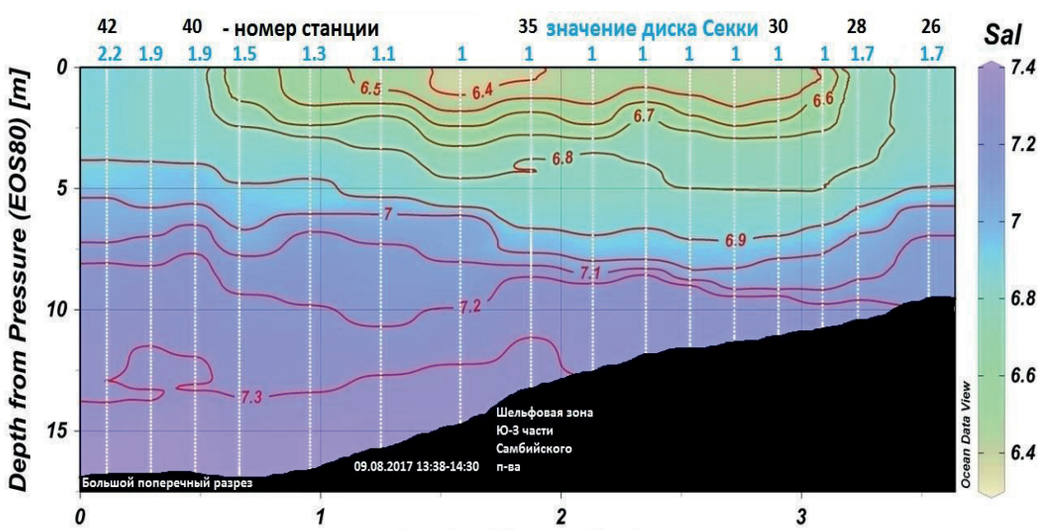


Рис.1. Поперечный разрез через плюм. Вверху синим цветом указывается значение прозрачности воды по диску Секки на данной станции

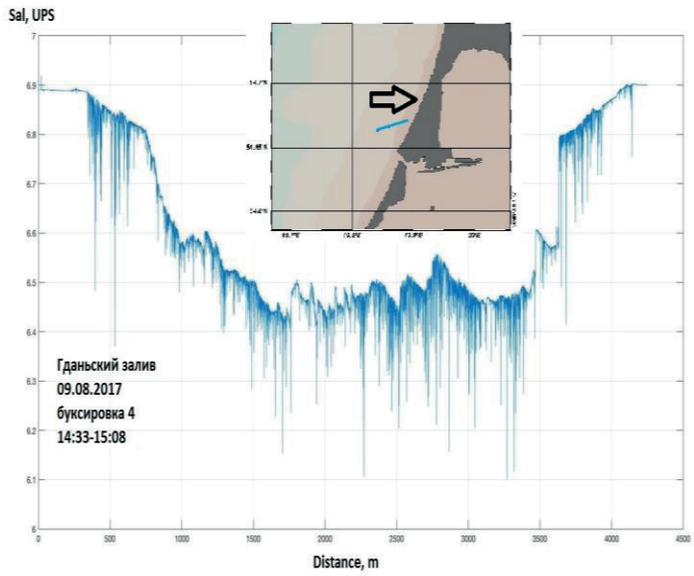


Рис. 2. Буксировка поперёк плюма. График зависимости солёности от расстояния до точки начала буксировки

Сбор данных и обработка результатов произведена при поддержке гранта РГО-РФФИ 17-05-41029. Подготовка оборудования, методическое сопровождение и постановка задачи были проведены в рамках темы № 0149-2014-0017 государственного задания ИО РАН.

УДК 433.91.911.2

Оценка биомассы фитопланктона с помощью CNPSi-модели на примере Белого моря

Е.В. Колтовская, А.В. Леонов

Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова
Институт океанологии РАН им.П.П.Ширшова

Прогнозирование изменения свойств природных вод, в том числе, прогнозирование качества природных вод, возможно по мере накопления информации об основным химико-биологических показателях вод. Важнейшим и наиболее часто измеряемым среди последних является биомасса микроорганизмов низших трофических уровней – фито и зоопланктона. В работе с помощью модели были получены данные биомассы фитопланктона с целью их анализа и сопоставления с экспедиционными данными биомассы. Математическая инструмент представляет собой имитационную гидроэкологическую боксовую CNPSi-модель, предназначенную для водно-экологических исследований, при использовании которой в качестве входной информации применяются накопленные гидрометеорологические и гидрохимические данные об изучаемом водном объекте – Белом море. Акватория изучаемого водоема в модели разделена на 9 зон (4 залива, губа Чупа, Бассейн, Горло, Воронка и Соловецкие острова), имеет однослойную структуру.

В качестве основного показателя биомассы рассмотрен фотосинтетический пигмент хлорофилл-а. Его значения так же сопоставлялись со значениями натурными, путем расчета соотношения массы субстрата к массе пигмента в клетках.

Подобная работа позволила обновить базы входных и выходных параметров вышеописанной модели, а также убедиться в ее адекватности и надобности.

Литература

1. *Леонов А. В., Филатов Н. Н., Здоровеннов Р. Э., Здоровеннова Е. Э.* Функционирование экосистемы Белого моря: исследование на основе математической модели трансформации органогенных веществ. Водные ресурсы. 2004. Т. 31. № 5. С. 556–575.

УДК 531.3:681.5.01

Решение задачи оптимального по расходу топлива маневра орбитальной пилотируемой станции псевдоспектральным методом Лобатто

А.А. Прутько

Московский физико-технический институт (государственный университет)
ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С. П. Королёва»

Введение. В работе представлены результаты разработки алгоритмов оптимальных по расходу топлива маневров больших космических конструкций, таких как орбитальные пилотируемые станции (ОПС), с использованием реактивных двигателей [1]. Перед стыковками и расстыковками транспортных и грузовых кораблей требуется развернуть ОПС на большие углы определенным образом, поэтому решение данной задачи является актуальной. В данной работе предлагается использовать псеводспектральный метод Лобатто для решения задачи по оптимальному управлению орбитальной станцией.

Постановка задачи и цель работы. В рамках этой работы целью является получить оптимальные траектории разворотов ОПС в орбитальной системе координат (ОСК) по рысканью на 180°, вокруг оси Эйлера (–1, 1, 0) на 180° и по тангажу на 90°. Так как на ОПС при движении действуют гравитационный и аэродинамический моменты сил, предлагается использовать их для уменьшения затрат топлива при работе реактивных двигателей. При решении данной задачи будем считать, что ОПС – твердое тело.

Требуется найти управление и траекторию, доставляющие минимум функционалу *J*, при следующих ограничениях:

$$J = Q\int_0^{t_f} \sum_{m=1}^{M} u_m dt\,,$$

$$\dot{\mathbf{q}} = \frac{1}{2}\cdot\left(\mathbf{q}\circ\vec{\boldsymbol{\omega}} - \vec{\boldsymbol{\omega}}^{orb}\circ\mathbf{q}\right),\ \mathbf{q}(0) = \bar{\mathbf{q}}_{0,}\mathbf{q}\left(t_f\right) = \bar{\mathbf{q}}_f\,,$$

$$\dot{\vec{\boldsymbol{\omega}}} = \mathbf{J}^{-1}\left(-\left[\vec{\boldsymbol{\omega}}\times\mathbf{J}\vec{\boldsymbol{\omega}}\right] + \vec{\boldsymbol{\tau}}^{d} + \vec{\mathbf{T}}^{th}\cdot\vec{\mathbf{u}}\right),\ \vec{\boldsymbol{\omega}}(0) = \vec{\bar{\boldsymbol{\omega}}}_{0,}\vec{\boldsymbol{\omega}}\left(t_f\right) = \vec{\bar{\boldsymbol{\omega}}}_f\,,$$

где $\mathbf{q}$ – кватернион ориентации ОПС относительно ОСК, $\vec{\boldsymbol{\omega}}$ – угловая скорость ОПС, $\mathbf{J}$ – тензор инерции ОПС, $\vec{\mathbf{T}}^{th}$ – момент сил, создаваемый реактивными двигателями, $\vec{\boldsymbol{\tau}}^{d}$ –гравитационный и аэродинамический [2] моменты сил, $\vec{\mathbf{u}}$ – вектор управления реактивными двигателями размерности *M*, Q – массовый расход рабочего тела.

Псевдоспектральный метод Лобатто. Оптимизационные задачи могут быть решены численно, используя псевдоспектральные методы, которые дискретизируют задачу в выбранных точках при помощи ортогональных функций. Псевдоспектральный метод Лобатто [3] использует точки Лежандра–Гаусса–Лобатто (LGL) и полиномы Лежандра. Пусть

$$L_N = \frac{1}{2^N N!}\frac{d^N}{dt^N}\left(\tau^2 - 1\right)^N$$

полином Лежандра степени *N* на интервале $\left[\tau_0, \tau_N\right] = \left[-1, 1\right]$. Точки LGL $\tau_0 ... \tau_N$ являются корнями производной полинома Лежандра степени N – $\dot{L}_N$. Преобразование к произвольному отрезку $\left[t_0, t_f\right]$ производится следующим образом:

$t(\tau)=\frac{(t_f-t_0)\tau+(t_f+t_0)}{2}$. Функцию состояния и функцию управления будем аппроксимировать на отрезке $[-1,1]$ при помощи следующих выражений:

$$x(t)\approx x^N(t(\tau))=\sum_{i=0}^{N}x_i\varphi_i(\tau),\ u(t)\approx u^N(t(\tau))=\sum_{i=0}^{N}u_i\varphi_i(\tau),$$

где x_i и u_i – значения функций в точках LGL, φ_i – базис Лагранжа. Производную функции состояния запишем следующим образом:

$$\dot{x}(t)\approx\dot{x}^N(t(\tau))=\frac{dx^N}{d\tau}\frac{d\tau}{dt}=\frac{2}{(t_f-t_0)}\sum_{i=0}^{N}x_i\dot{\varphi}_i(\tau)=\frac{2}{(t_f-t_0)}\sum_{i=0}^{N}\mathbf{D}_{ki}x_i,$$

где $\mathbf{D}_{ki}$ – матрица дифференцирования Лобатто, которая вычисляется в точках LGL.

Численное интегрирование функционала осуществляется при помощи правила Гаусса–Лобатто:

$$\int_{t_0}^{t_f}F(x(t),u(t))dt=\frac{(t_f-t_0)}{2}\sum_{i=0}^{N}F(x_i,u_i)w_i,$$

где w_i – веса, рассчитанные в точках LGL.

Таким образом, задачу оптимального управления можно свести к задаче нелинейного программирования, которая решается при помощи решателей таких задач:

$$J=\frac{(t_f-t_0)}{2}Q\sum_{i=0}^{N}\sum_{m=1}^{M}u_{im}w_i,$$

$$\frac{2}{(t_f-t_0)}\sum_{i=0}^{N}\mathbf{D}_{ki}\mathbf{q}_k=\frac{1}{2}\cdot(\mathbf{q}_k\circ\vec{\boldsymbol{\omega}}_k-\vec{\boldsymbol{\omega}}_k^{orb}\circ\mathbf{q}_k),k=0...N,\ \mathbf{q}_0=\bar{\mathbf{q}}_0,\mathbf{q}_N=\bar{\mathbf{q}}_f,$$

$$\frac{2}{(t_f-t_0)}\sum_{i=0}^{N}\mathbf{D}_{ki}\vec{\boldsymbol{\omega}}_k=\mathbf{J}^{-1}\left(-[\vec{\boldsymbol{\omega}}_k\times\mathbf{J}\vec{\boldsymbol{\omega}}_k]+\vec{\boldsymbol{\tau}}_k^{d}+\vec{\mathbf{T}}_k^{th}\cdot\vec{\mathbf{u}}_k\right),k=0...N,\ \vec{\boldsymbol{\omega}}_0=\bar{\vec{\boldsymbol{\omega}}}_0,\vec{\boldsymbol{\omega}}_N=\bar{\vec{\boldsymbol{\omega}}}_f.$$

Заключение. Задача оптимального управления сведена к задаче нелинейного программирования и успешно решена при помощи решателей, которые используют алгоритмы метода внутренней точки и последовательного квадратичного программирования. Были получены результаты в виде траекторий маневров и функций управления для различных разворотов. В дальнейшем планируется увеличить точность расчетов разбиением временного отрезка на несколько частей, а также добавить учет упругих колебаний конструкции [4].

Литература

1. *Атрошенков С.Н., Платонов В.Н., Губарев Ф.В., Саратов А.А*. Оптимальный по расходу топлива алгоритм разворота МКС с помощью реактивных двигателей с учетом ограничений по нагрузкам на конструкцию // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2017. № 4. С. 118–138. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-4-118-138.
2. *Атрошенков С.Н., Прутько А.А.* Учет влияния набегающего потока атмосферы для КА с изменяемой геометрией с разнонаправленными осями вращения подвижных элементов // Труды LI чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского. Секция «Проблемы ракетной и космической техники» (г. Калуга, 20–22 сентября 2016 г.). Казань: Изд-во Казан.ун-та, 2017. 210 с. С. 112–122.
3. *Garg, D., Patterson, M. A., Hager, W. W., Rao, A. V., Benson, D. A., and Huntington, G. T.*, An Over view of Three Pseudo spectral Methods for the Numerical Solution of Optimal Control Problems // «2009 AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference», Pittsburgh, PA, August 10–13, 2009.

4. *Прутько А.А., Сумароков А.В.* О нагрузках на элементы конструкции многоцелевого лабораторного модуля на автономном участке полета // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2017. № 2. С. 123–138. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-2-123-138.

УДК 533.666.2: 629.7

Влияние профиля ветра в приземном слое на движение парашютной системы с упругим звеном

С.В. Журин

ПАО Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва

Теоретические и экспериментальные исследования парашютных систем (ПС) с упругим звеном показали их работоспособность [1–3]. Использование ПС такого типа позволяет добиться значительных преимуществ по сравнению с традиционными средствами десантирования, а именно: значительное снижения динамических перегрузок при наполнении купола парашюта, высокая скорость снижения, гашение вертикальной и горизонтальной составляющих скоростей при посадке [1]. Для лётных экспериментальных исследований системы такого типа разработан, изготовлен и испытан прототип ПС полётной массой ~ 10 кг (см. рис. 1). Площадь купола парашюта Fп = 2,2 м^2. Для уменьшения балансировочного угла атаки конструкция парашюта дополнена цилиндрической юбкой [4]. В данной работе приводятся результаты лётного эксперимента, проведенного 6 августа 2017 в районе грунтового аэродрома в 15 км от Переславля-Залесского Ярославской области. Для подъёма используется двухместных мотодельтаплан. Сброс произведён в 6 часов 30 минут. Температура воздуха около 17 °С. Скорость ветра 3 ÷ 4 м/с (по флюгеру).

Траектория полёта получена с помощью GPS-трекера GPSLogger, установленного на смартфоне HTC Desire C, который вложен в карман на общем чехле ПС. Ввод в действие произведён на высоте 766 м над эллипсоидом вращения, моделирующего поверхность Земли. Посадка произошла на высоте 211 м через 74 с. Средняя скорость снижения составила $V_{сн}$ = 7,5 м/с.

При анализе зависимостей курса и высоты от времени можно сделать вывод, что на высотах от 0 до 500 метров над уровнем земли во время эксперимента ветер дул в западном направлении.

Траектория, полученная при помощи приёмников GPS, демонстрирует устойчивое поступательное движение. Направление ветра определяет движение ПС в горизонтальном направлении. От точки сброса до точки посадки ПС унесло на ≈ 620 м в западном направлении.

Видеозапись полёта ПС с земли сделана на видеокамеру смартфона ASUS_X008D. Съёмка началась через 7 с после сброса ПС и завершилась через 4 с после посадки, общая продолжительность 71 с.

Качество видеозаписи не очень хорошее, груз под парашютом становится различим только примерно через 59 с после сброса ПС. Начиная с этого момента определены координаты парашюта и груза на кадрах. Посадка произошла на 74 с полёта, но в последние 1,5 с полёта координаты груза на кадре не зафиксированы, т.к. изображение сливается с лесом на горизонте и определить его положение весьма затруднительно.

На рис. 2 показана зависимость изменения угла отклонения упругого звена от вертикали в плоскости кадра. Кривая иллюстрирует наличие периодического процесса с амплитудой 4 ÷ 6° и периодом ≈ 1,5 с. Во время видеосъёмки вертикаль в кадре не соответствовала истинной вертикали, поэтому колебания кривой происходят не относительно нулевого значения. Тем не менее, заметное изменение угла наклона в интервале 66 ÷ 69 с коррелирует с изменением относительной длины упругого звена в этом же интервале времени. Во время полёта ПС происходит периодическое перемещение парашюта в горизонтальной плоскости, что вызвано тем, что балансировочный угол атаки

у парашюта с цилиндрической (а не конической) юбкой немного отличается от нулевого. Выявленные колебания практически не влияют на характер движения ПС в целом.

Анализ экспериментальных данных показывает, что при движении на высоте 40 ÷ 50 м в проведенном эксперименте происходит заметное изменение угла наклона (до 10°) ПС к вертикали, которое вызвано существенным градиентом скорости ветра на этих высотах. При проектировании парашютных систем с характерными размерами в десятки метров необходимо учитывать влияние градиента скорости в приземном атмосферном слое на функционирование систем мягкой посадки.

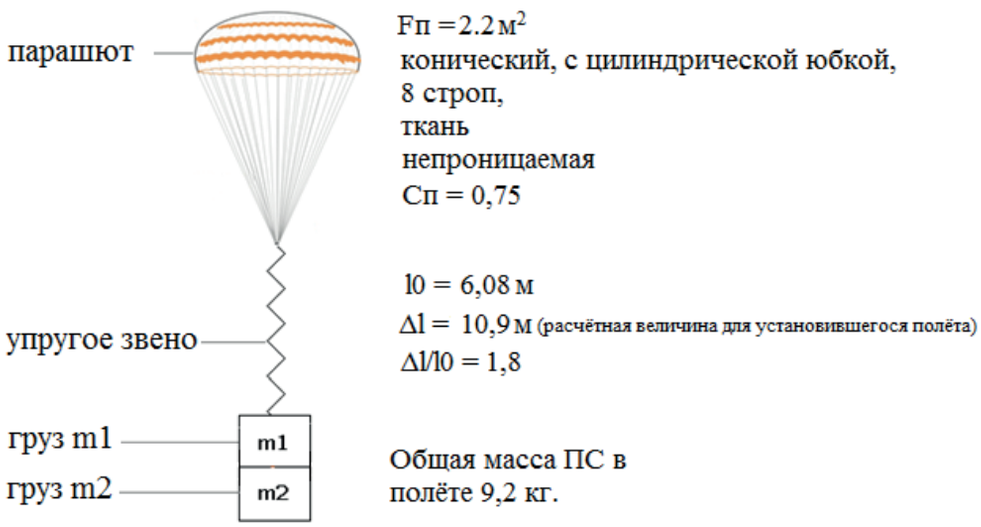


Рис. 1. Схема экспериментальной ПС

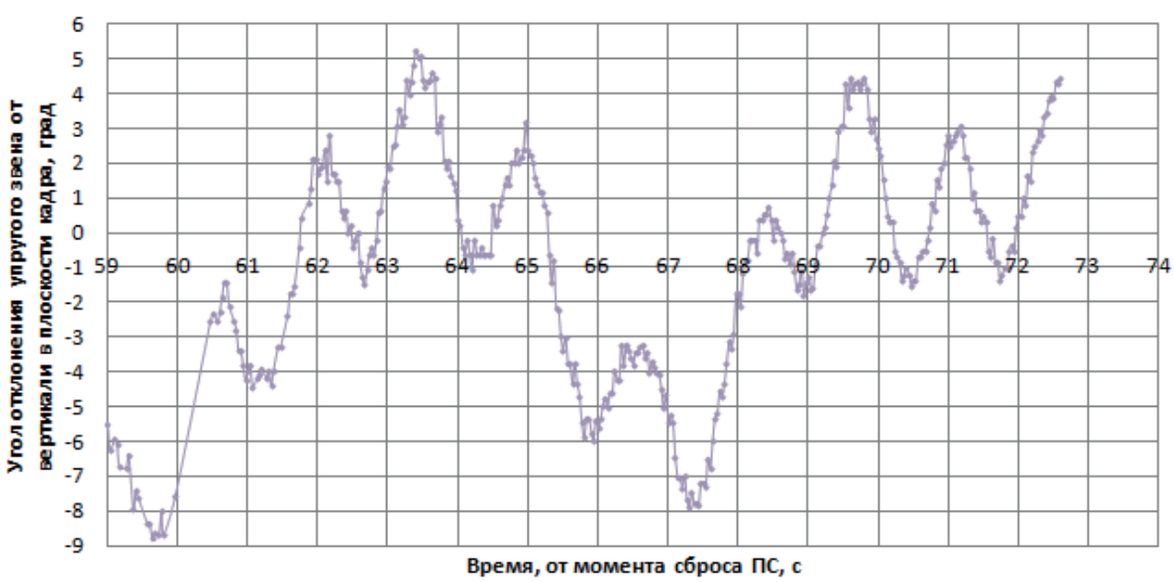


Рис. 2. Зависимость угла отклонения упругого звена от вертикали в плоскости кадра от времени

Литература

1. *Царёва Д.Ю., Журин* С.В. Исследование механических свойств упругого звена из резины // Труды 58-ой научной конференции МФТИ. Аэрофизика и космические исследования. 23–28 ноября 2015 года. М.: МФТИ, 2015. С. 114–115.
2. *Журин С.*В. Мягкая посадка на планеты с атмосферой при помощи парашютной системы с упругим звеном // Сборник тезисов докладов XL Академических чтений по космонавтике памяти академика С.П. Королёва. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. С. 26.
3. *Журин С.В.* Парашютно-реактивная система мягкой посадки с упругим звеном // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23, № 1 С. 107–114.

4. *Носарев И.М.* Труды ЦАГИ. Выпуск 1735. Аэродинамические исследования парашютов при различных углах атаки. 1976.

УДК 629.783

Учёт затенений КА при планировании коррекций поддержания ГСО электроракетными двигателями

А.Р. Агишев

ОАО «Корпорация «Комета»
Московский физико-технический институт (государственный университет)

На высокоорбитальных КА с длительным сроком эксплуатации для поддержания орбиты используются электроракетные двигатели. Но при прохождении КА через тень или полутень Земли или Луны прекращается или снижается электроснабжение от солнечных панелей. Это необходимо учитывать при планировании коррекций орбиты такими двигателями и рассчитывать интервалы времени затенений. На ГСО (геостационарной орбите) затенения Землёй происходят вблизи дат равноденствий и могут продолжаться до 1 часа 15 минут [1]. За это время КА перемещается по долготе в инерциальной системе координат на ±9,4° относительно 0° и 180°. Затенения Луной случаются не более двух раз в году. Как правило, их длительность не превышает несколько минут, но в исключительных ситуациях может превышать 4 часа 30 минут [2].

На основе анализа статистики ГСО различных КА показано по данным [3, 4], что при наклонениях, превышающих примерно 1°, долгота узлов орбиты удалена от долготы 0° или 180° более чем на 39,4°, требуемых при максимальной длительности коррекции. Поэтому затенения при коррекциях достаточно больших наклонений отсутствуют [5]. Но при коррекциях наклонений, не превышающих 0,1°, затенения Землёй необходимо учитывать.

Для расчёта затенений Землёй и Луной разработан алгоритм на следующем принципе. Вычисляют инерциальные координаты КА, Солнца и Луны с шагом по времени, длительность которого мала по сравнению с максимальной продолжительностью учитываемого затенения. На каждом таком шаге вычисляют два угла при наблюдении с КА: между направлениями на Солнце и Землю и на Солнце и Луну. Если хотя бы один из этих углов меньше соответствующего контрольного угла, учитывающего угловые размеры Солнца и Земли или Луны, а также их угловое смещение за один шаг и погрешность модели, то фиксируют факт затенения. Сумма шагов, на которых затенение найдено без перерыва, считается интервалом затенения, для которого с точностью до округлённого шага известно время начала и окончания.

Для ускорения расчёта с целью его выполнения на КА алгоритм усовершенствован. Поиск затенения выполняется в два этапа: вначале грубая проверка, а затем уточнение найденных интервалов затенений. Вычисления координат Луны и Солнца по точным и ресурсоёмким алгоритмам выполняются не на каждом малом минутном шаге, а через увеличенные интервалы времени порядка одного часа. На малых шагах эти координаты рассчитывают интерполяцией. Погрешность вычислений при этом остаётся приемлемой.

Программная реализация алгоритма показала для ГСО уменьшение времени расчёта благодаря указанным улучшениям в 27 раз для наиболее сложной ситуации при затенении Землёй и соседствующим с ним наиболее длительным затенении Луной. Для более простых ситуаций время улучшено на два порядка.

Алгоритм может быть адаптирован для расчёта затенений на других высоких орбитах.

Литература

1. *Чернявский Г.М., Бартенев В.А*. Орбиты спутников связи. М.: Связь, 1978. 240 с.

2. *Назаров А.Е.* Проблема «13» для геостационарных космических аппаратов // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. 2013. № 4. С. 18−21.
3. Зональный каталог ГСО. Режим доступа: http://lfvn.astronomer.ru/report/0000030/GEO_orbit.htm
4. Каталог NORAD. Режим доступа: http://celestrak.com
5. *Назаров А.Е.* Решение задачи высокоточного удержания геостационарного космического аппарата в заданной точке «стояния». Проектирование автоматических космических аппаратов для фундаментальных научных исследований. Т. 1. М.: МАИ-Принт, 2013.492 с.

УДК 004.3:004.41:004:75

Поиск оптимальной орбиты спутника для освещения заполярных городов

А.А. Богер

ПАО Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва

Для освещения заполярных районов России в зимний период предлагается использовать отраженный от спутника-осветителя (СО) световой поток. Отражатель спутника представляет собой вращающийся мембранный диск с внешним радиусом 50 м, который снабжен центральной жесткой вставкой радиусом 5 м для передачи момента импульса от корпуса космического аппарата (КА) к полотну мембраны. Угловые маневры СО осуществляет с помощью скрытого гироскопического момента. Сам спутник относится к классу аппаратов с двойным вращением. Вращение мембранного диска компенсируется вращением управляющего гироскопа в подвесе Гука [1]. Материал мембраны – алюминизированная полиамидная пленка толщиной 10 мкм с коэффициентом отражения 89%. Спутник находится на приполярной орбите. Предварительные расчеты показали, что для достижения освещенности поверхности Земли в 2 лк (уровень уличной освещенности в ночное время), а так же для обеспечения непрерывности освещения заполярных районов необходимо использовать несколько группировок спутников-осветителей. В работе решается задача оптимизации: при требуемом уровне освещенности минимизировать количество спутников в составе каждой группировки, варьируя параметры орбиты спутников-осветителей.

Поставленная задача выбора оптимальной траектории решается методом математического моделирования. Критериями достижения поставленной цели являются среднесуточная освещенность заданного участка поверхности Земли с указанными координатами; освещенность от времени: ищутся орбиты с так называемой равномерной освещенностью в течение суток или половины суток; а также время нахождения над горизонтом цели и вне тени Земли.

Формула, по которой рассчитывается освещенность:

$$I = \varepsilon * \eta * I_{SE} * \frac{A}{\pi * \alpha^2 * h^2} * \cos(\varphi) * \cos(\theta),$$

где I_{SE} =135 000 лк – освещенность от прямых солнечных лучей, ε = 0.89 – коэффициент отражения мембранного диска, η = *0.7* – коэффициент прозрачности атмосферы, α = 31'30" – угловой размер Солнца для Земли, h – расстояние между спутником и целью, A – площадь зеркала, φ – угол падения солнечного света на зеркало, θ – угол падения отраженного от зеркала света на поверхность Земли.

Таким образом, явно видно, что с увеличением высоты спутника освещенность будет падать пропорционально квадрату. Однако при этом на большем числе витков осветитель будет находиться над горизонтом цели и вне тени Земли, что уменьшает время пребывания на участках, на которых осветить цель данным КА невозможно. А от этого в свою очередь зависит количество аппаратов в группировке, необходимых для создания непрерывного освещения.

Для решения поставленной задачи была разработана математическая модель движения СО, освещающего заданную «точку» поверхности планеты. Модель была разработана на основании материалов [2]. Она учитывает влияние полярного сжатия Земли (J2), но не учитывает влияние притяжения Луны, Солнца и сопротивление атмосферы.

Результаты моделирования проиллюстрированы графической информацией, представленной на рис. 1.

График показывает освещенность Норильска (69.347962° с.ш., 88.203056° в.д.) спутниками, находящимися на разных по высоте полярных орбитах. Синий и зеленый графики – круговые орбиты на высотах 400 км и 4000 км, красный – эллиптическая орбита с высотами 400 км в точке перигея и 4000 км в точке апогея. Представленная графическая информация позволяет провести сравнительный анализ орбитальных траекторий, полученных методом математического моделирования, и сделать выводы об оптимальности решения поставленной задачи.

Второй преследуемой целью данной работы является расчет угловой скорости программного разворота СО, необходимой для освещения заданного района Земли. Она не должна превышать максимально допустимой величины, определяемой конструктивными особенностями мембранного диска. Данный вывод также делается на основании анализа результатов математического моделирования.

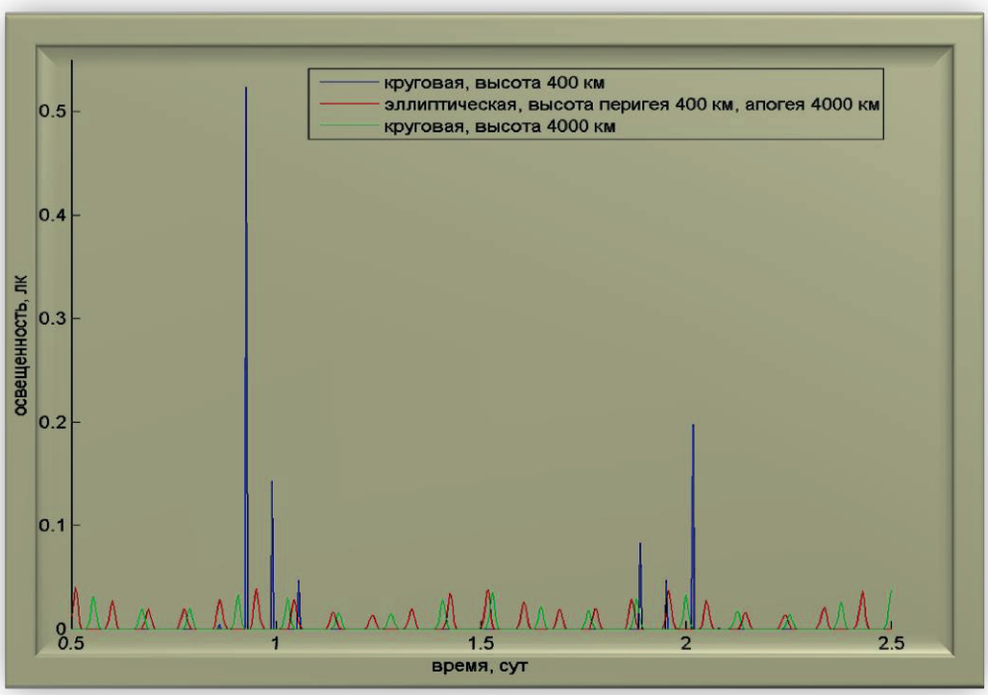


Рис. 1

Литература

1. Задачи управления движением космического аппарата с вращающимся солнечным парусом: монография / *Богданов К.А.* [и др.]; под ред. д.т.н Тимакова С.Н. Королев: РКК Энергия, 2016. 116 с.
2. *Сумароков А.В., Тимаков С.Н, Богданов К.А.* О решении задачи наведения спутника осветителя на заданный район поверхности Земли и оценка освещенности // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2017. № 6. С. 115-00. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-6-115-00
3. Введение в динамику космического полета: учеб. пособие / *Овчинников М.Ю.* М.: МФТИ, 2016. 208 с.: ил., табл.
4. Спутники Земли искусственные. Основные системы координат для баллистического обеспечения полетов и Методика расчета звездного времени: методические указания. РД 50-25645.325–89.
5. *Егоров М.А., Егоров В.А., Сазонов В.В.* Управление элементами орбиты спутника-осветителя // Космические исследования. 1995. Т. 33, № 2. С. 220–224.

УДК 629.78.086: 517.977.5: 550.388.2

Оптимизация траектории выведении на геостационарную орбиту с целью снижения радиационной нагрузки на космический аппарат

А.Е. Старченко

ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва»

При многократном перелёте межорбитального космического буксира между низкой круговой и геостационарной орбитами при помощи электроракетных двигателей доза космической радиации, поглощенная бортовой электроникой из радиационных поясов Земли, оказывается превышающей допустимые пределы для различных компонентов бортовой аппаратуры. Этот факт необходимо учитывать при проектировании межорбитального буксира. Наиболее распространёнными способами решения данной проблемы является использование более дорогой радиационно-стойкой элементной базы или перекомпоновка приборно-агрегатного отсека с целью увеличения эффективной толщины защиты электронных компонентов. Последний способ также иногда приводит к необходимости установки дополнительной радиационной защиты некоторых компонентов, что может привести к снижению полезной массы, транспортируемой буксиром.

В работе рассмотрен способ снижения поглощённой бортовой электроникой дозы радиации путём выбора специальной формы траектории выведения [1]. Варьируя форму траектории вокруг траектории с оптимальным быстродействием, можно обнаружить траектории с меньшей дозой поглощенной радиации и немного большим временем выведения. Формально идея этого метода формулируется как добавление в задачу оптимального по быстродействию перелёта между орбитами [2] дополнительного уравнения для дозы радиации:

$$\frac{dD}{dt} = N_D\left(r(t), i(t)\right)$$

и краевого условия на дозу на правом конце:

$$D(T) = D_f < D_{\min T},$$

где $D(t)$ – поглощенная космическим аппаратом доза радиации с начала перелёта $t = 0$ и до момента времени t, $N_D\left(r(t), i(t)\right)$ – мощность дозы потоков электронов и протонов радиационных поясов Земли на орбите радиусом $r = r(t)$ и наклонением $i = i(t)$, D_f – требуемая доза радиации, $D_{\min T}$ – доза радиации, полученная данным космическим аппаратом на траектории оптимального по быстродействию выведения.

Для решения краевой задачи, получающейся в результате применения принципа максимума Понтрягина к вышеуказанной задаче оптимального управления, в данной работе применяется метод продолжения по параметру [2]. При выведении на геостационарную орбиту космического аппарата массой 40.8 т с круговой орбиты высотой 800 км и наклонением 51.6 градусов было получено снижение поглощенной дозы радиации до 44% от дозы на траектории оптимального быстродействия. При этом увеличение затрат характеристической скорости не превосходило 868 м/с. Увеличение времени выведения не превысило 11.1% от величины оптимального времени выведения.

Литература

1. *Dutta A*., *Libraro P*. [*et al.*]. Minimum-Fuel Electric Orbit-Raising of Telecommunication Satellites Subject to Time and Radiation Damage Constraints // 2014 American Control Conference (ACC). June 4–6, 2014. Portland, Oregon, USA.

2. *Петухов В. Г.* Оптимизация многовитковых перелетов между некомпланарными эллиптическими орбитами // Космические исследования. 2004. Т. 42, № 3. С. 1–20.

УДК 629.78

Алгоритм переориентацией космического аппарата на высокоэллиптической орбите

Е.А. Воробьева, А.В .Богачев

ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва»

В работе рассматривается космический аппарат (КА) на высокоэллиптической орбите (ВЭО). Для таких орбит характерно деление орбиты на два участка: рабочий (РУ) (в окрестности апогея) и дежурный (ДУ) (в окрестности перигея). На ориентацию КА на данных участках накладывается ряд ограничений со стороны системы электропитания, системы обеспечения температурного режима и полезной нагрузки по положению Солнца. Исходя из этих ограничений на рабочем участке ориентация близка к орбитальной, на дежурном – к инерциальной. Для перехода с одного участка на другой необходимо осуществить разворот КА, также разворот необходимо осуществлять для проведения коррекции орбиты как в перигее и апогее, так и в окрестности точек пересечения орбиты с ее малой осью. Как показал опыт, в том числе эксплуатационный, для таких КА на ВЭО довольно часто возникают ситуации, когда при развороте аппарата вокруг оси Эйлера по кратчайшей траектории [1] ограничения, накладываемые на ориентацию аппарата относительно Солнца, нарушаются, что может привести к выходу из строя отдельных систем или КА в целом. Чтобы этого не допустить, предлагается новый алгоритм переориентации КА, учитывающий все накладываемые ограничения. Задача усложняется еще и тем, что необходимо сократить до минимума переходные процессы в конце разворота.

Целью работы является разработка нового алгоритма переориентации КА, учитывающего ограничения по ориентации КА относительно направления на Солнце и минимизирующего переходные процессы в конце разворота.

Внешний вид КА и оси связанной системы координат (XсскYсскZсск) представлены на (рис. 1).

Для построения траектории разворота предлагается следующий алгоритм.

1. Вводятся следующие вспомогательные системы координат:
   - o приборная система координат (ПСК): оси ПСК совпадают с требуемой ориентацией КА в конце разворота;
   - o инерциальная система координат (ИСК): ось OY_0 совпадает с вектором направления на Солнце, OZ_0 лежит в плоскости $OY_{ПСК}Z_{ПСК}$, OX_0 дополняет систему координат до правой.
2. В трех каналах управления определяются три угла рассогласования между ИСК и связанной с КА системой координат в начале и в конце разворота, а также производные по времени от этих углов.
3. По каждому каналу управления траектория разворота разбивается по времени на два участка (рис. 2): на первом участке (от начала разворота до промежуточного момента времени t_m) рассматривается равноускоренное движение, на втором (от промежуточного момента времени до окончания разворота t_n) – равнозамедленное.
4. Решая совместно системы уравнений, описывающие угловое равноускоренное и равнозамедленное движение [2], находим величину углового ускорения и времени переключения в соответствующем канале управления.

Траектория разворота КА на ВЭО при переходе с дежурного на рабочий участок орбиты для случая: $\alpha = 45^{\circ}$ и $\beta = 45^{\circ}$ представлена на рис. 3. На рис. 3 показан годограф единичного вектора направления на Солнце в связанной с КА системе координат, а также начальное и конечное положения указанного вектора в проекции на ССК при развороте КА.

Здесь α – угол между проекцией вектора направления на Солнце на плоскость орбиты и вектором, направленным из центра Земли к перигею. Угол α отсчитывается в направлении движения КА вокруг Земли и принимает значения от –180° до +180°. β – угол между направлением на Солнце и плоскостью орбиты, принимающий значения от –90° до +90°. β положителен, если вектор направления на Солнце составляет острый угол с вектором орбитальной угловой скорости.

Для различных ориентаций КА относительно направления на Солнце было произведено сравнение представленного в работе алгоритма с алгоритмом переориентации КА, основанного на разворот вокруг оси Эйлера по кратчайшей траектории. Данное сравнение показало, что при использовании предлагаемого алгоритма количество нарушений ограничений по ориентации во время разворота уменьшилось более чем в 14 раз.

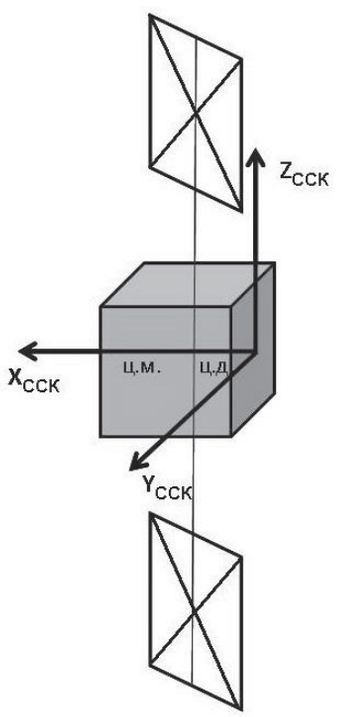


Рис. 1. Внешний вид КА

Рис. 2. Схема разворота, где ε_0 – угловое ускорение

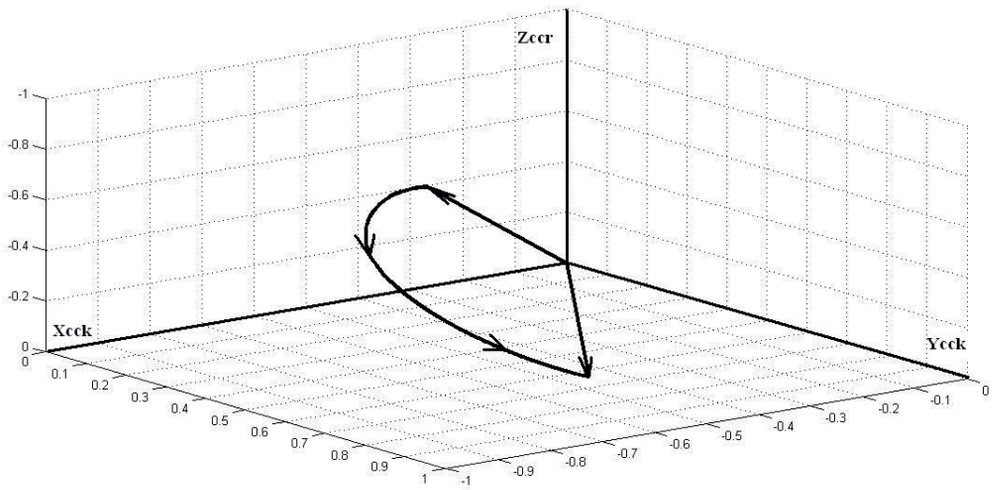


Рис. 3. Траектория разворота КА

Литература

1. *Бранец В.Н.* Лекции по теории бесплатформенных инерциальных навигационных систем управления. М.: МФТИ, 2009. 304 с.
2. *Айзерман М.А.* Классическая механика. М.: Наука, 1974. 368 с.

УДК 629.78:351.814.3

Задача поиска и поддержания равновесной ориентации МКС

К.А. Богданов

Московский физико-технический институт (государственный университет)
ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королева»

Рассматриваются угловое движение Международной Космической Станции (МКС). Динамика МКС описывается линеаризованной системой уравнений, полученной при применении теоремы об изменении кинетического момента отдельно к корпусу станции и отдельно к вращающимся элементам конструкции (в данном случае гиродинам). К данной системе добавляются несколько уравнений, описывающих аэродинамику [1]. В данной задаче это три первых тона разложения в ряд Фурье функции плотности атмосферы по витку, которые представляются в виде осцилляторов и оказывают влияние на ориентацию станции по каналам рысканья и тангажа. В качестве орбитальной системы координат используется система LVLH (Local–Vertical Local–Horizontal).

МКС рассматривается как линейный объект управления. Отдельно рассматривается управление ориентацией станции по гироскопически-связанным каналам крена и рысканья и отдельно по каналу тангажа. Вектор состояния объекта управления включает в себя компоненты углового положения станции и компоненты угловых скоростей, компоненты вектора кинетического момента гиродин и их интегралы, а также несколько переменных, описывающих осцилляционную составляющую изменения плотности атмосферы и отвечающих за аэродинамическое сопротивление.

Для построения закона управления ориентацией МКС используется модифицированный метод модального управления. В качестве эталонного полинома как для построения закона управления по каналам крен + рысканье, так и по каналу тангажа используются обобщенные полиномы Баттерворта. Корни данного семейства полиномов лежат на комплексной *S*-плоскости в левой полуплоскости на участке дуги окружности с центром в начале системы координат симметрично относительно действительной оси, ограниченной сверху и снизу прямыми, проходящими через начало координат. Данное

расположение корней выбрано с целью обеспечения высокой степени устойчивости синтезируемой системе управления, а также низкой степени колебательности. В докладе приведены результаты математического моделирования, демонстрирующие эффективность получившегося закона управления.

Литература

1. *Harduvel J.T.* Continuous Momentum Management of Earth-Oriented Spacecraft. Journal of Guidance? Control? and Dynamics? November-December 1992.V. 15, N 6. C. 1417–1428.

УДК 517.929

Разработка резервного контура управления ориентацией космического аппарата на базе программируемых логических интегральных схем

В.С. Медведев

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Описана разработка резервного контура управления ориентации космического аппарата. Резервный контур может быть в качестве запасного, аварийного при выведении основного контура управления КА. Разработка резервного контура осуществляется на базе программируемых логических интегральных схем. Резервный контур представлен регулятором. Для его описания запишем уравнение движения твердого тела относительно центра масс [1]:

$$2\dot{Q}_i^e = Q_i^e \circ (w_{абс}) - (w_0)_i \circ Q_i^e . \quad (1)$$

Здесь Q_i^e – кватернион разворота из оппорного базиса i в связанный базис e, $w_{абс}$ – кватернион вектора абсолютной скорости объекта управления в e, w_0 – кватернион относительная скорости опорного базиса i в проекциях на i.

Примем за $w_0 = (0 \quad 0 \quad 0 \quad 0)$, тогда кинематическое соотношение запишется в виде

$$2\dot{Q}_i^e = Q_i^e \circ (w_{абс}) . \quad (2)$$

Динамическое уравнение движения твердого тела вокруг неподвижной точки под действием внешнего момента [2]:

$$Jw_{абс} + w_{абс} \times Jw_{абс} = M . \quad (3)$$

Интегрирование кинематического соотношения:

$$P_i = \frac{1}{2} w_i h , \quad (4)$$

$$S_P = P_1 P_1 + P_2 P_2 + P_3 P_3 , \quad (5)$$

$$S_R = R_0 R_0 + R_1 R_1 + R_2 R_2 + R_3 R_3 , \quad (6)$$

$$P_0 = \frac{1}{2}(3 - S_P - S_R) . \quad (7)$$

Кватернион в момент времени $t+h$:

$$\begin{aligned} Q_0 &= R_0 P_0 - R_1 P_1 - R_2 P_2 - R_3 P_3, \\ Q_1 &= R_0 P_1 - R_1 P_0 - R_2 P_3 - R_3 P_2, \\ Q_2 &= R_0 P_2 - R_2 P_0 - R_3 P_1 - R_1 P_3, \\ Q_3 &= R_0 P_3 - R_3 P_0 + R_1 P_2 - R_2 P_1. \end{aligned} \quad (8)$$

Для тестирования работы модели регулятора был спроектирован и разработан испытательный стенд на базе ПЛИС. Основные компоненты стенда: макетная плата A3PE1500-PQ208 с последовательной логикой System8051s, реализующей модель регулятора и дополнительной аппаратной логикой, модель объекта на ПК с операционной системой QNX для замыкания обратной связи.

В основе System8051s лежит IP-ядро 8051s совместимое с семейством микроконтроллеров 8051, которое дает разработчику ряд преимуществ: достаточное быстродействие для задач управления с тактом порядка нескольких десятков миллисекунд, возможность подключения периферии через шину APB (занимает не слишком много ресурсов ПЛИС, что важно при работе радиационно-стойкими ПЛИС). Вся разработка велась с использованием системы контроля версий git. Поэтому всю информацию по разработке можно посмотреть в репозитории: https://github.com/vmed/fpga_regulator.

На испытательном стенде была натурно-математически промоделирована работа регулятора. В процессе моделирования с помощью разработанного desktop-приложения testAppQNX можно наблюдать ход работы регулятора в режиме реального времени.

Как видно из графика (рис. 1), работа модели регулятора полностью соответствует ожиданиям. В начале КА разгоняется до ~ 0.1 рад/сек, потом равномерно поворачивается с этой скоростью. Далее регулятор приводит в скользящем режиме КА в целевое положение.

Если рассмотреть внимательнее рис. 1 в точке (0,0), можно заметить, что регулятор переводит систему в состояние, в котором ux сигнал не превышает u0.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что при совершенствовании модели регулятора, приближении его уравнений движений к реальности, а также при применении радиационно-стойких ПЛИС, несмотря на относительно скромные вычислительные ресурсы, представляется перспективным использовать system8051s в качестве основы для регулятора резервного контура управления ориентации на реальных космических аппаратах, т.к. такой регулятор будет обладать заведомо повышенной стойкостью к сбоям от радиационных эффектов благодаря малому по сравнению с микропроцессорами занимаемому на полупроводниковом кристалле объему ячеек памяти и возможности применения резервирования этих ячеек.

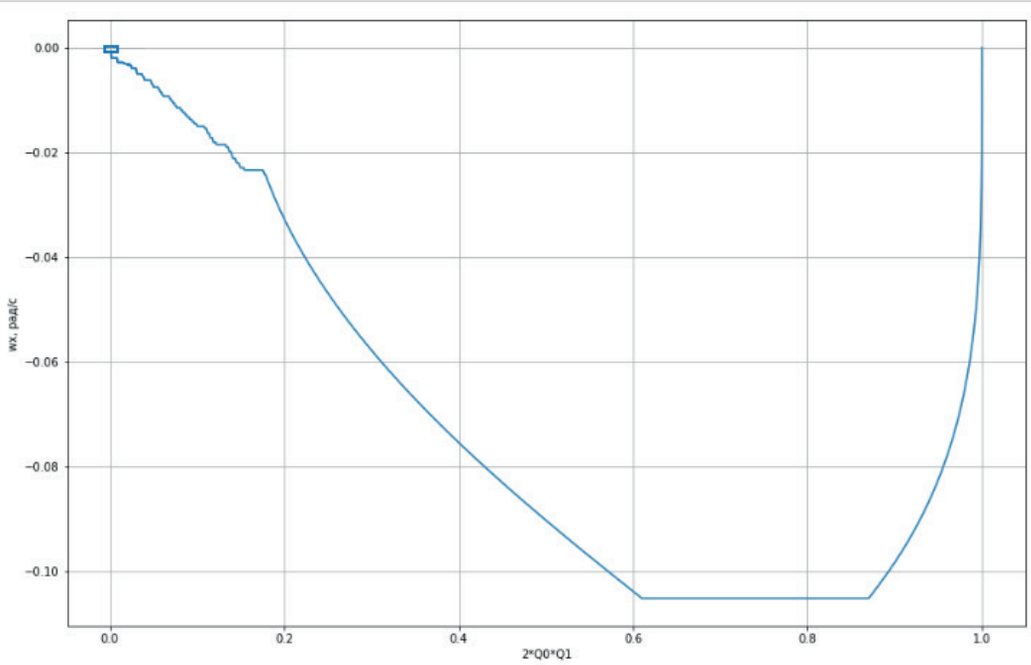


Рис. 1. Фазовый портрет смоделированного движения КА на испытательном стенде

Литература

1. *Бранец В.Н., Шмыглевский И.П.* Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела

М.: Наука, 1972.
2. *Рауншебах Б.В.* Управление ориентацией космических аппаратов М.: Наука, 1974.
3. *Бранец В.Н.* Лекции по теории бесплатформенных инерциальных навигационных систем управления. М.: МФТИ, 2009.

УДК 681.7.012, 520.2.03

Оценка предельно допустимых отклонений оптических элементов зеркально-линзовых оптических схем

А.Г. Зотова, Г.А. Щербина

ЗАО «НПО «Лептон»
Московский физико-технический институт (государственный университет)

В настоящее время уделяется особое внимание производству космических оптико-электронных систем высокого разрешения, позволяющих решать задачи космического мониторинга поверхности Земли. Существующие подходы основаны на использовании дополнительных датчиков положения оптических компонент [1, 2]. Но такие системы технически сложные и не являются устойчивыми к смещению датчиков системы контроля относительно контролируемых оптических элементов. Поэтому перспективным является подход, основанный на оценке оптического качества с использованием полиномов Цернике, для проведения которого требуется проведение анализа вариационных параметров, причем такой анализ корректно проводить на этапе выбора оптической схемы и конструктивного устройства прибора. Решение прямой задачи нахождения функции рассеяния точки (ФРТ) из коэффициентов Цернике приведено в [3], а обратной задачи расчета из ФРТ коэффициентов Цернике подробно рассмотрено в [4].

В данной работе произведен анализ наиболее распространенных осевых зеркально-линзовых оптических схем, а именно: объектива Ричи–Кретьен (Рис. 1а) и зеркально-линзового объектива на сферах с пластинами Шмидта (Рис. 1б). Критерием являлось понижение ФПМ на 50% от съюстированного состояния.

Назначение анализа вариационных параметров состоит в определении предельно допустимых величин смещений оптических компонент для различного набора компенсационных параметров. На начальном этапе ОС находилась в съюстированном состоянии, затем она выводилась из него посредствам смещений и наклонов главного или вторичного зеркала. Далее встроенными алгоритмами оптимизации в программном обеспечении Zemax проводился процесс юстировки ОС. Вводными параметрами оптимизации являлись количество и расположение варьируемых элементов (ВЭ). Также ясно, что увеличение количества ВЭ положительно сказывается на способности системы провести компенсацию оптических искажений, но приводит к значительному увеличению масса-габаритных показателей, энергопотребления, а также усложняет алгоритмическую часть процесса юстировки. Такой процесс проводился для ОС Ричи–Кретьен и зеркально-линзового объектива на сферах с пластиной Шмидта в отдельности.

Рассмотрим ОС Ричи–Кретьен более подробно. В ходе анализа было выяснено, что наибольший вклад в компенсацию систем вносят подфокус, смещения и наклоны главных и вторичных зеркал. Однако использование трех коррекционных элементов (подфокус + смещение ВЗ) или (подфокус + наклон ВЗ) является недостаточным для проведения юстировки. А разница между съюстированным положением и состоянием после компенсации составляет не более 0.71 мм для смещений и не более 0.39º для наклонов. По итогам анализа предложено использовать пять корректирующих элементов: фокусировку, смещения и наклоны вторичного зеркала.

Рассмотрение зеркально-линзовой ОС на сферах показывает, что использование трех коррекционных элементов (фокусировка-смещение вторичного зеркала или главного зеркала) является недостаточным для проведения юстировки. При этом разница улучшения за счет использования трех коррекционных элементов составляет не более 0.41 мм для смещений и не более 1.45º для наклонов. По итогам анализа предложено использовать пять

корректирующих элементов: фокусировку, смещения вторичного зеркала, смещения главного зеркала.

Таким образом, в данной работе проведен анализ варьируемых параметров для двух ОС. Проведение изучения оптических схем на этапе постановки задачи и разработки рабочей документации значительно упростит дальнейший процесс юстировки и эксплуатации прибора. Такое подробное рассмотрение ОС является отправным для разработки специализированных методов первоначального выставления оптических компонент.

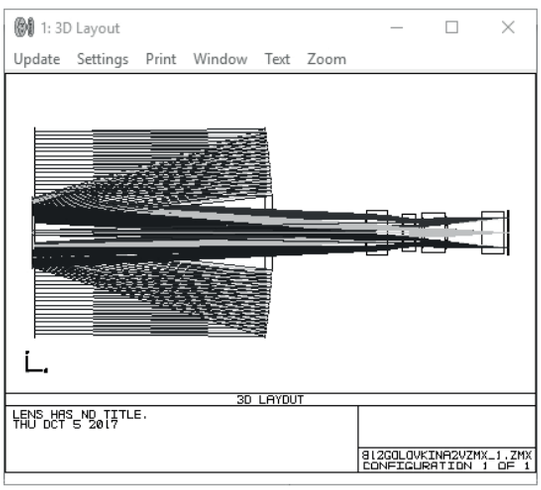


Рис. 1а. ОС Ричи–Кретьена

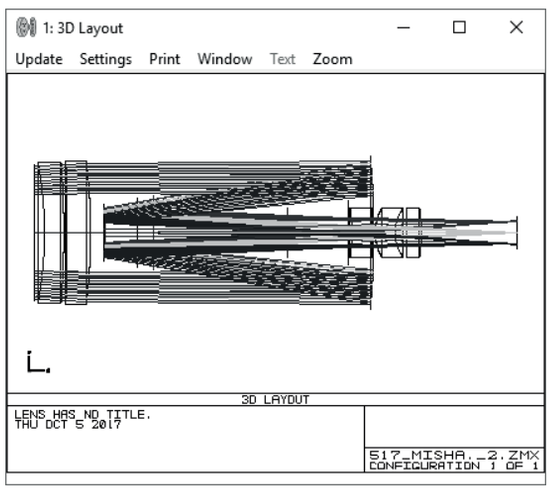


Рис. 1б. ОС с пластинами Шмидта

Таблица 1.

Величины допусков на расположение основных элементов объектива Ричи-Кретьен

Элемент и параметр, для которого считается допуск			Без оптимизации	Подфокус	Подфокус + наклон ВЗ	Подфокус + смещение ВЗ	Подфокус + смещение ВЗ+ наклон ВЗ	Подфокус + смещение ВЗ + наклон ВЗ + смещение ГЗ
ГЗ	смещение	ox, мм	0.09	0.1	0.15	0.5	0.8	-
		oy, мм	0.09	0.1	0.15	0.5	0.8	-
	наклон	ox, °	0.06	0.06	0.3	0.08	0.45	0.8
		oy, °	0.06	0.06	0.3	0.08	0.45	0.8
	смещение	oz, мм	0.007	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
ВЗ	смещение	ox, мм	0.085	0.09	–	–	–	–
		oy, мм	0.085	0.09	–	–	–	–
	наклон	ox, °	0.07	0.07	–	–	–	–
		oy, °	0.07	0.07	–	–	–	–

	смещение	oz, мм	0.008	0.25	–	–	–	–

Таблица 2.

Величины допусков на расположение основных элементов зеркально-линзового объектива на сферах с пластинами Шмидта

Элемент и параметр, для которого считается допуск			Без оптимизации	Подфокус	Подфокус + смещение ВЗ	Подфокус + смещение ГЗ	Смещение (ГЗ+ВЗ) + подфокус
ГЗ	смещение	ox, мм	0.9	0.9	0.95	–	–
		oy, мм	0.9	0.9	0.95	–	–
	наклон	ox, °	0.09	0.09	0.13	–	0.5
		oy, °	0.09	0.09	0.13	–	0.5
	смещение	oz, мм	0.02	0.6	0.6	–	0.6
ВЗ	смещение	ox	0.9	0.9	–	1	–
		oy	0.9	0.9	–	1	–
	наклон	ox, °	0.15	0.15	–	0.2	1.6
		oy, °	0.15	0.15	–	0.2	1.6
	смещение	oz, мм	0.017	0.3	–	0.3	0.3

Литература

1. *Савицкий А.М.* Принципы построения оптических систем термостабилизированных телескопов дистанционного зондирования Земли: диссертация на соискание ученой степен. СПб, 2012. 191 с.
2. *Молев Ф.В.* Исследование оптико-электронной системы определения взаимного рассогласования элементов космического телескопа: диссертация на соискание ученой степени. СПб, 2014. 143 с.
3. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
4. Sven van Haver. The Extended Nijboer-Zernike Diffraction Theory and its Applications: Ph. D. Dissertation. Delft University of Technology, 2010. 176 p.

УДК 528.88

Влияние различных факторов на измерения СПЭЯ космическими средствами

Д.М. Великосельская, В.С. Марков

Московский физико-технический институт (государственный университет)

В работе были исследованы влияния точности определения ФСЧ и параметров атмосферы: содержание озона, водяного пара, аэрозолей на значения СПЭЯ и вегетационных индексов (Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) и Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI), Simple Ratio (SR)) для растительности и почвы.

Для анализа влияния ФСЧ съемочной аппаратуры на значения СПЭЯ растительности (трава, дуб, клен, ель, сосна) и почвы (коричневый пылеватый суглинок, очень темный серо-коричневый пылеватый суглинок) были получены значения СПЭЯ с

использованием ФСЧ съемочной аппаратуры КА «Канопус-В», ФСЧ описываемой функцией Гаусса степени: 1.2, 1.4, 1.8, 2, 4.

Для анализа влияния параметров атмосферы на значения СПЭЯ растительности и почвы были получены значения СПЭЯ для ФСЧ съемочной аппаратуры КА «Канопус-В» для разного содержания озона, водяного пара и аэрозолей в атмосфере.

Чтобы проверить возможность решения таких тематических задач, как определение типа растительности и почвы и их состояния, по полученным значениям СПЭЯ были посчитаны индексы NDVI (для растительности), ARVI (для растительности), и SR (для растительности и почвы) по формулам [1]:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}, \quad (1)$$

$$ARVI = \left(\frac{\rho_{NIR} - 2*\rho_{RED} - \rho_{BLUE}}{\rho_{NIR} + 2*\rho_{RED} - \rho_{BLUE}}\right), \quad (2)$$

$$SR = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{RED}}. \quad (3)$$

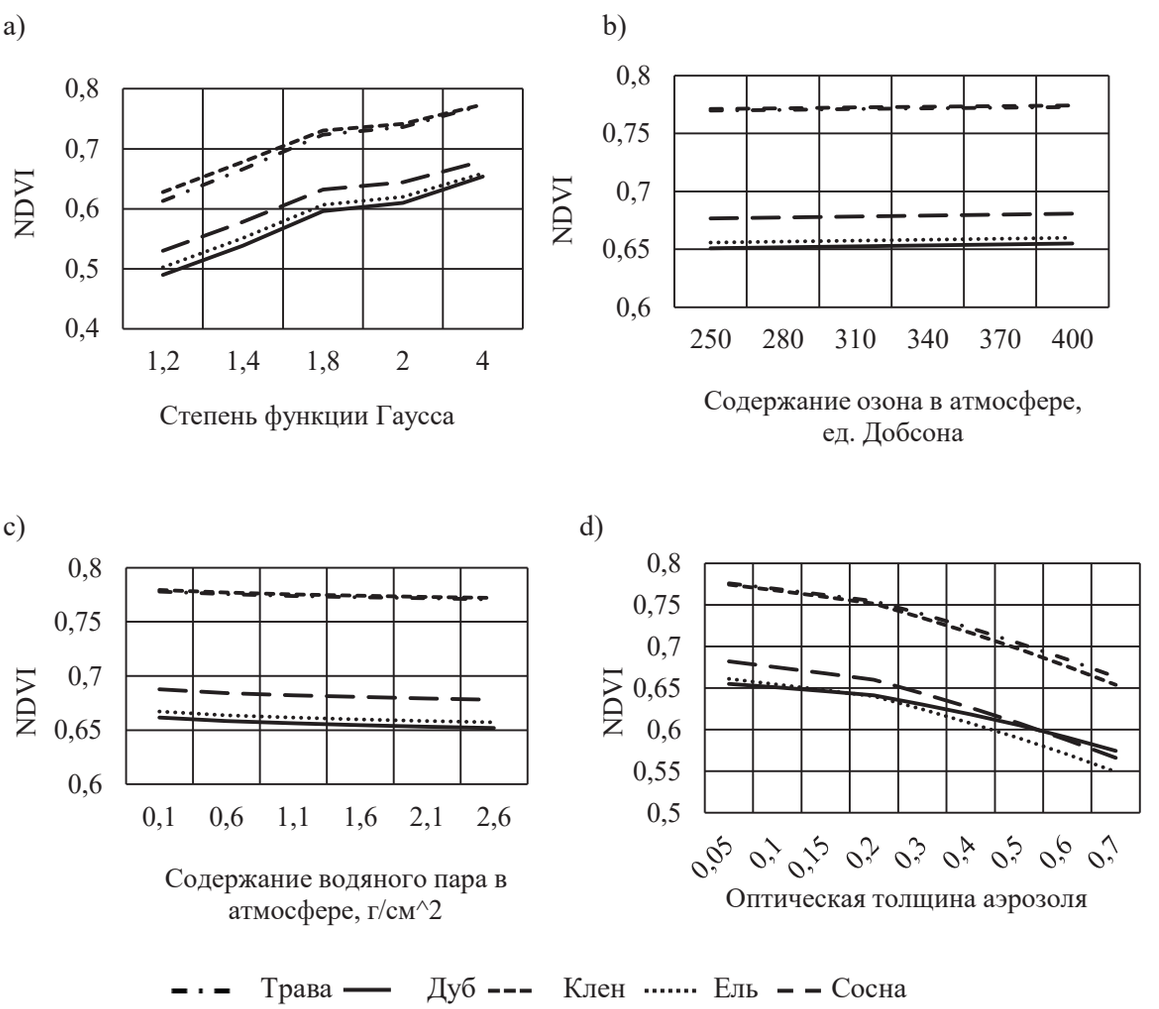


Рис. 1. Графики зависимости индекса NDVI от a) степени функции Гаусса; b) изменения содержания озона в атмосфере; c) изменения содержание водяного пара в атмосфере; d) изменения оптической толщины аэрозоля в атмосфере

На рис. 1 изображены графики зависимости индекса NDVI от степени функции Гаусса, изменения содержания озона, водяного пара в атмосфере и разной оптической толщины аэрозоля. По графикам видно, что при изменении ФСЧ и оптической толщины

аэрозоля можно получить одинаковые значения индексов для разных типов растительности. При изменении содержания озона и водяного пара в атмосфере индексы NDVI для каждого типа растительности не меняются.

Таким образом, для оценки состояния и классификации растительности с помощью съёмочной аппаратуры КА «Канопус-В» по вегетационным индексам достаточно учитывать стандартное содержание озона в атмосфере, которое составляет около 300 ед. Добсона и среднее содержание водяного пара в атмосфере, характерное для определенного места и времени. Кроме того необходимо знать ФСЧ съемочной аппаратуры, и оптическую толщину аэрозоля на момент съемки.

Литература

1. *Воронина П.В., Мамаш Е.А*. Классификация тематических задач мониторинга сельского хозяйства с использованием данных дистанционного зондирования MODIS Вычислительные технологии. 2014. Т. 19, № 3. С. 76–102.

УДК 520.626.05

Детектор молний для МКС

В.Е. Квитка

Филиал АО «РКЦ «Прогресс» – НПП «ОПТЭКС»

Задача создания отечественного детектора молний космического базирования является сложной научно-технической проблемой. В настоящее время на низкой околоземной орбите находятся две камеры производства США (КА TRMM и МКС). Кроме того, на геостационарной орбите работает детектор молний GLM, размещённый на спутнике GOES-R.

Ключевой проблемой регистрации молний из космоса является необходимость обнаружения достаточно тусклых кратковременных вспышек на фоне ярких облаков, хорошо отражающих солнечный свет. Это порождает следующие требования к аппаратуре:

- высокая светосила объектива;
- высокая квантовая эффективность фотоприёмника и большой размер пикселя;
- необходимость введения в оптическую схему узкополосного интерференционного светофильтра;
- наличие высокоскоростных методов и алгоритмов обработки получаемых изображений.

В докладе подробно рассмотрены данные аспекты.

Требование к высокой светосиле объектива порождает проблему оптимизации массогабаритных характеристик камеры. Кроме того, объектив должен сочетать данную характеристику с большим полем зрения $2w = 90°$.

В связи с большой яркостью фона (облаков) появляются высокие требования к фотоприёмнику. В докладе подробно описан выбор фотоприёмника для камеры, исходя из требования в частоте кадров 1000 Гц и параметрам чувствительности.

Одной из ключевых проблем работы является необходимость создания оптической схемы с крайне узкой шириной полосы пропускания света (1…2 нм). Особенность работы интерференционного светофильтра такова, что при ненулевом угле падения луча центр полосы пропускания сдвигается в коротковолновую область. Подобный эффект может быть катастрофичен, так как при столь узкой полосе пропускания вспышка молнии окажется за пределами изменившегося спектра пропускания светофильтра. Доклад включает в себя подробный расчёт энергетических параметров камеры. Описаны варианты возможных оптических схем, сводящих к минимуму искажения спектрального пропускания светофильтра. Проверка правильности расчётов осуществлена путём компьютерного моделирования получаемых изображений для различных условий съёмки.

Кроме аппаратных решений, в докладе описаны и создаваемые алгоритмы обработки информации. Ключевые проблемы здесь следующие:

- большой информационный поток (1000 кадров в секунду);
- низкое соотношение сигнал/шум, требующее новых решений в методах межэлементной обработки снимков;
- необходимость исключения ложных срабатываний камеры, вызванных схожими по физической модели событиями (блики от зеркальных поверхностей, яркие фонари, пожары, свет от ночных городов, фейерверки и т.д.).

УДК 528.851

Модернизированный вариант бортовой радиометрической коррекции в ИК-аппаратуре ДЗЗ

Ю.М. Гектин[1], М.Б. Смелянский[1], Р.В. Андреев[1], А.А. Зайцев[1,2], С.Д. Коган[1]

[1]АО «Российские космические системы»
[2]Московский физико-технический институт (государственный университет)

С целью обновления и расширения геостационарной группировки гидрометеорологических спутников 11 декабря 2015 года состоялся запуск КА «Электро-Л» №2 с модернизированным МСУ-ГС [1]. Модернизация устройства МСУ-ГС была направлена на повышение радиометрического качества изображений, формируемых в ИК-диапазоне спектра, и обеспечение их одновременного формирования. В первом образце МСУ-ГС изображения в ИК-диапазонах формировались последовательно.

Недостатком, имеющим принципиальный характер, который не удалось устранить в рамках модернизации ИК-модуля МСУ-ГС, является зависимость измеренных значений радиационной температуры от положения КА относительно Солнца (так называемый «суточный ход»). Следует заметить, что в мировой практике этот недостаток присущ в большей или меньшей степени всей аппаратуре ИК-диапазона на геостационарных КА с трехосной ориентацией [2]. Для лучшего понимания причин этого явления необходимо некоторое разъяснение. В настоящее время общепринятым методом первичной бортовой или наземной обработки цифровых сигналов от объектов съемки является так называемая двухточечная коррекция, которая обеспечивает стабильность линейного преобразования воспринимаемого приемником излучения энергетического потока за счет использования опорных сигналов низкого и высокого уровней от эталонных источников излучения, входящих в состав бортовой системы калибровки аппаратуры. При этом решающее значение имеет соблюдение принципа сквозной калибровки, когда излучение от эталонных источников проходит через все элементы оптического тракта, заполняя всю его апертуру. Однако, в силу конструктивных и временных ограничений, при диаметре входного зрачка оптической системы порядка 200 мм и более сквозная калибровка становится практически нереализуемой.

Поэтому при разработке аппаратуры МСУ-ГС как в первоначальном, так и в модернизированном вариантах было принято компромиссное решение, состоит в том, что опорный сигнал низкого уровня формируется при исходном положении сканирующего зеркала, когда прибор «смотрит» в космос. При этом приемники воспринимают фоновое и рассеянное излучение ото всех оптических компонентов, оправ и других элементов конструкции. Источником опорного сигнала высокого уровня является имитатор абсолютно черного тела (ИАЧТ), представляющий собой термостатированный с точностью 0,1 К металлический диск диаметром ≈ 50 мм, который вводится в промежуточное сечение оптического тракта после приемного объектива при калибровке перед началом съемки [3]. Таким образом, при калибровке по «горячему» фоновое и рассеянное излучение от оптических и конструктивных элементов приемного объектива отсекается и разность высокого и низкого опорных сигналов, которая при двухточечной коррекции определяет масштаб выходного сигнала, становится зависимой от изменения интенсивности фонового и рассеянного излучения в передней части оптической системы. Поскольку же эта интенсивность в условиях геостационарной орбиты зависит от положения КА

относительно Солнца, то имеет место суточный ход и сезонные изменения обработанного по алгоритму двухточечной коррекции (нормализованного) сигнала.

Существенно улучшить ситуацию можно за счет включения в состав ИК-модуля МСУ-ГС низкотемпературного имитатора черного тела, конструктивно подобного описанному выше «горячему» и вводимого в то же сечение оптического тракта на короткий интервал времени перед началом съемки. Охлаждение до температуры порядка –15° должно осуществляться при нахождении ИАЧТ (в нерабочем положении) внутри теплоизолированной кассеты, соединенной тепловой трубой с внешним радиатором, открытым в космос. Термостабилизация как кассеты, так и ИАЧТ должна обеспечиваться посредством электронагревательных элементов и соответствующей системы автоматического регулирования. Формирование опорных сигналов от последовательно вводимых в одно и то же сечение оптического тракта термостабилизированных «холодного» и «горячего» имитаторов черного тела позволяет обеспечить постоянство масштаба выходного сигнала.

Зависящие от положения КА относительно Солнца фоновая и рассеянная составляющие сигнала должны компенсироваться при первичной обработке путем вычитания из текущего значения сигнала от объекта съемки опорного сигнала, формируемого при визировании в космос и обновляемого с временным интервалом 2 периода сигнала. Таким образом, предполагается использование для первичной обработки видеоинформации 3-х опорных сигналов, что по существу представляет собой 3-точечную коррекцию и является в определенном смысле «ноу-хау».

Литература

1. *Москатиньев И.В.* [*и др.*]. Основные результаты эксплуатации аппаратуры МСУ-ГС на КА «Электро-Л» № 2 // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. № 2. С. 108–114. ISSN 2075-6941.
2. *Johnson R.X., Weinreb M.P.* GOES-8 imager midnight effects and slope correction // Proc. SPIE 2812, GOES-8 and Beyond, 18 October 1996. doi: 10.1117/12.254104.
3. *Гектин Ю.М., Смелянский М.Б., Рыжаков А.В.* Многозональное сканирующее устройство для дистанционного получения изображений полного диска Земли с геостационарной орбиты // Патент № 2589770 РФ. G02B 26/10. Заявл. 19.05.2015; опубл. 10.07.2016.

УДК 538.91

Разработка технологии поверхностного монтажа планарных структур с диодами Шоттки в высокочастотную передающую линию

Т.Л. Зильберлей[1], Н.С. Каурова[2], Б.М. Воронов[2], Ю.В. Лобанов[1,2], И.В. Третьяков[1,2], А.С. Шураков[2], А.А. Корнеев[1,2]

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2]Московский педагогический государственный университет

Диоды с барьером Шоттки являются одним из детекторов, применяемых в субмиллиметровом диапазоне длин волн (0,1–1 мм). Развитие техники детектирования и наблюдений в данном диапазоне востребовано для интроскопии неметаллических объектов (в т.ч. в системах безопасности), астрофизических исследованиях, устройств радиолокационных измерений, медицинских систем томографии и терапии. Диод Шоттки может быть выполнен в виде дискретного элемента, который монтируется в высокочастотную передающую линию. Главное преимущество диодов Шоттки на частотах от 500 ГГЦ до 1 ТГЦ в том, что они работают при комнатной температуре, в то время как альтернативные детекторы HEB (Hot Electron Bolometer), SIS (Superconductor–Insulator–Superconductor) требуют глубокого охлаждения.

Настоящая работа посвящена разработке технологии монтажа планарных структур с диодами Шоттки в высокочастотную передающую линию для чего, в первую очередь, была разработана технология изготовления чипов с геометрическими размерами реальных

структур – 30:70:20 мкм^3. Благодаря этому можно было отработать технологию интегрирования с диодами Шоттки в планарную передающую линию.

Тестовые чипы изготавливались на основе SOI (кремний на изоляторе). На лицевой стороне формируется сам чип, а на обратной – вытравливается до стоп-слоя SiO_2. Таким образом формируется чип.

На лицевой стороне пластины были сформированы знаки совмещения под фото– и электронную литографию. Далее, для глубокого плазмохимического травления кремния (20 мкм), на лицевой стороне формировали алюминиевую маску методом lift-off. Плазмохимическое травление выполнялось на установке Corial 200R.

На обратной стороне также была сделана фотолитография с точным совмещением со знаками на лицевой стороне. Для глубокого (300 мкм) травления кремния с обратной стороны электронно-лучевым экспонированием была сформирована маска с дальнейшим осаждением Al_2O_3 и с дальнейшим lift-off процессом. После чего проводилось плазмохимическое травление на установке Corial 200R.

Заключительным этапом изготовления является «выламывание» чипа из SiO_2 мембраны. Также нами была разработана и изготовлена подложка с индиевыми контактными площадками, которая играла роль передающей линии при отработке технологии интегрирования. Для этого были сформированы знаки совмещения под фото- и электронную литографию с дальнейшим формированием индиевых контактов lift-off методом под flip-chip технологию монтажа.

В результате был разработан и опробован технологический маршрут и были изготовлены тестовые чипы для отработки процесса микросборки, а также разработана и изготовлена подложка с индиевыми контактными площадками, на которые осуществляется монтаж чипа.

Рис. 1. Схематичное изображение чипа в разрезе

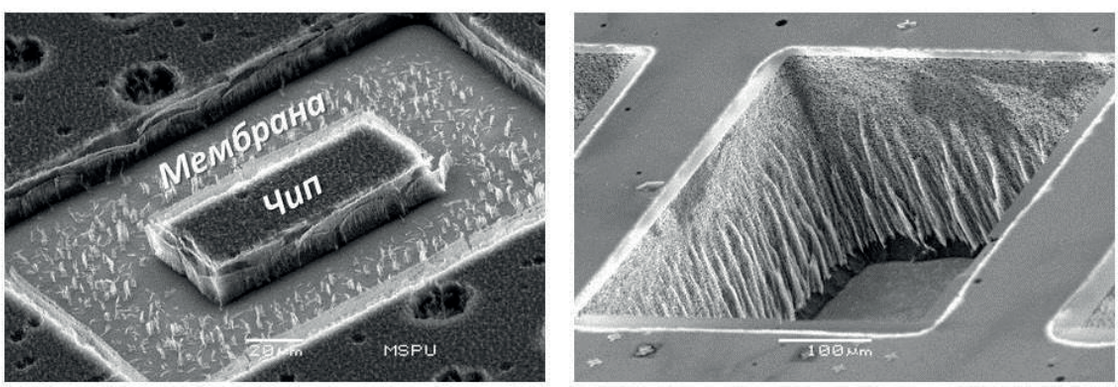


Рис. 2. 2а – Лицевая сторона чипа; 2б – обратная сторона чипа (Снимок сделан в растровом электронном микроскопе)

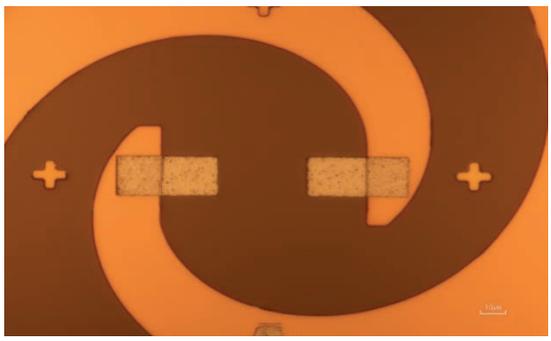


Рис. 3. Подложка с контактными площадками (Снимок сделан с использованием оптического микроскопа)

Литература

1. *Sobis P.* Subharmonic Sideband separating Schottky diode mixer for submillimetre wave applications. 2010. ISSN 1652-0769..
2. *Biber S., Murk A., Schmidt L., Kampfer N.* Design and measurement of a 600 GHz micromachined horn antenna manufactured by combined DRIE and KOH-Etching of silicon // Int. Symp 2005. P. 507.

УДК 550.3+551.5:629.78

Численный анализ информационных возможностей гиперспектрометрии аномальных климатических изменений с помощью космической группировки CLARREO

В.А. Головко[1,2], И.В. Сайто[2]

[1]Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета»
[2]Московский физико-технический институт (государственный университет)

При детектировании долговременных климатических изменений методами космического мониторинга наряду с абсолютной точностью измерений ключевую роль играет информационное содержание спектрометрической информации. Основными недостатками существующих космических систем наблюдений являются их недостаточная спектральная представительность и стабильность измерений. Кардинально изменить ситуацию должна перспективная космическая система CLARREO (Climate Absolute Radiance and Refractivity Observatory), которая планируется к развёртыванию в 2018–2020 гг.

Главная особенность новейшей системы состоит в переходе от использования радиометров к гиперспектрометрам в качестве основных измерительных приборов. Космическая группировка CLARREO будет включать четыре спутника, движущихся друг за другом по одной и той же орбите, обеспечивая возможность взаимной калибровки с оперативно функционирующей широкополосной аппаратурой CERES, а также с вводимыми в эксплуатацию перспективными зондирующими системами. В преддверие активной фазы миссии CLARREO наиболее актуальной исследовательской задачей является выяснение потенциальных возможностей новейшей системы детектировать малые за длительный промежуток времени изменения основных геофизических параметров, характеризующих климатическую систему Земли [1].

Беспрецедентно высокая точность и стабильность измерений CLARREO позволят в значительной степени решить важнейшие задачи диагностики всех составляющих климатической системы «поверхность–атмосфера» Земли. Измерения с помощью аппаратуры, установленной на сегментах CLARREO, позволят восстанавливать значения практически всех наиболее важных геофизических параметров окружающей среды.

В рамках подготовки к поступлению реальных гиперспектральных измерений от системы CLARREO важные экспертные результаты можно получить с помощью ансамбля модельных рядов гиперспектров, вычисленных на основе данных наиболее совершенных климатических моделей, реализующих различные сценарии климатических изменений [2]. В этом случае в рамках каждой климатической модели мы обладаем исчерпывающей информацией: точно знаем модель, вносимые естественные и антропогенные изменения, выходные данные модели (в виде основных геофизических параметров) для разных временных интервалов прогноза от месяцев до десятилетий. Далее, используя современные модели переноса излучения, на основе временного ряда выходных данных климатических моделей рассчитываем соответствующие им временные ряды гиперспектров, согласованные с характеристиками измерительной аппаратуры, с целью анализа их обнаружительной способности по отношению к климатическим изменениям.

Данный доклад представляет экспериментальную технологию и результаты численных экспериментов по моделированию возможностей наблюдений малых изменений климатической системы на основе реальных аппаратурных характеристик космической системы CLARREO. Нами анализируется практически весь спектр возможных радиационных наблюдений из космоса: УДР – уходящая длинноволновая радиация (в диапазоне 200–2000 $см^{-1}$ или 5–50 мкм, что составляет 95% собственного излучения Земли) и УКР – уходящая коротковолновая радиация (в диапазоне 320–2300 нм, что составляет 96% отраженного солнечного излучения Земли). Максимальное спектральное разрешение для УДР принималось равным 0.5 $см^{-1}$, для УКР – 4 нм. При этом учитывалась возможность достижения беспрецедентно высокой точности измерений: для УДР – 0.065 K, для УКР – 0.3%.

Процесс переноса излучения – один из наиболее важных и сложных процессов в климатической системе. Адекватный расчет переноса излучения даже в относительно широких спектральных интервалах является достаточно трудоемким. Гиперспектральное же моделирование требует ещё больших вычислительных мощностей и поэтому, как правило, производиться на высокопроизводительных системах. К настоящему времени современные гетерогенные (CPU + GPU) компьютерные системы реализуются в основном в виде больших специализированных кластеров (суперкомпьютеров). Мы для гиперспектрального имитационного моделирования использовали аппаратно-программный комплекс (АПК) с приемлемой вычислительной производительностью на основе всего четырёх оптимизированных ПК в одном из компьютерных классов МФТИ. Каждый ПК нашего АПК включает 4-ядерный центральный процессор (CPU) Intel Core i5-3330 и графический ускоритель (GPU) Nvidia Geforce GT 640 (с 384-я ядрами). Радиационное моделирование осуществляется с одновременным использованием вычислительных мощностей и центрального процессора (CPU) и графического ускорителя (GPU). Процесс параллельности вычислений обеспечивается технологиями CUDA/OpenCL. Важной особенностью нашей организации распараллеливания вычислений является возможность распараллеливания как по спектру (для разных спектральных интервалов), так и по пространству (для разных пикселей географической сцены). При проведении расчетов был использован полинейный алгоритм (LBL) для наиболее высокоточного моделирования с максимальным спектральным разрешением (LBLRTM).

Анализ усредненных высокоразрешённых спектральных откликов на климатические изменения позволяет оценить величины радиационного форсинга при изменении различных геофизических параметров. При индивидуальном изменении различных климатических переменных (оставляя при этом остальные зафиксированными) можно оценить радиационную чувствительность каждой из них, например: эффект увеличения содержания метана и углекислого газа, влияние изменения температуры тропосферы и стратосферы, изменения содержания водяного пара в тропосфере и т.д.

За последние 35 лет (1980–2015 гг.) потепление наблюдалось во всех широтных зонах, однако наиболее значительный рост температуры был зафиксирован в высоких широтах северного полушария. Так если глобальная аномалия приземной температуры в 2016 году (признанным самым тёплым за всю историю наблюдений) достигла 1 °C, то в

зоне 64–90°с.ш. она составила уже около 3 °С. Одним из важных механизмов, объясняющим это экстремальное потепление, было выявление массированных выбросов метана в атмосферу вследствие деградации подводной мерзлоты в восточносибирском арктическом регионе, где наблюдается наиболее выраженная динамика климатических изменений.

В докладе проводятся расчеты применительно к выявлению детектирующей способности системы CLARREO по отношению к наиболее опасным аномалиям динамики геофизических параметров в восточно-сибирском регионе. Предварительные результаты показывают, что данный подход, основанный на моделировании гиперспектральных измерений по данным длительных наблюдений, позволит достоверно оценить потенциальные возможности космической системы CLARREO применительно к идентификации катастрофических климатических изменений в наиболее проблемных регионах РФ.

Литература

1. *Golovko V.A., Kondranin T.V., Kozoderov V.V*. Towards High Precision Hyperspectral Exploration of the Earth's Climate System from Space // The 40th COSPAR Scientific Assembly; Space Studies of the Earth's Surface, Meteorology and Climate (A); Towards Scientific Exploitation of Operational EO Missions for Land Processes and Natural Hazards (A3.1), 2–10 August 2014, Moscow, Russia, Abstract Golovko_oral_12978. pdf, http://cospar2014moscow.com/
2. *Leroy, S.S.* [*et al.*]. Testing climate models using thermal infrared spectra // J. Climate. 2008. 21. P. 1863–1875.

УДК 53.087.4

Возможности использования российских аппаратов для мониторинга OLR с учетом опыта зарубежных исследований

А. Николаева[1], С. Пулинец[2], Д. Узунов[3]

[1] Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2] Институт космических исследований РАН
[3] Университет Чэпмена, Оранж, Калифорния, США

В данной работе рассмотрена методика определения анормальной изменчивости длинноволнового инфракрасного излучения (OLR) в зоне подготовки землетрясения, согласованной с литосферно-атмосферно-ионосферной моделью [1]. Расчет производился по данным спутниковых инфракрасных радиометров в диапазоне длин волн 8–14 микрон, что соответствует диапазону OLR – излучения [2]. Использовались ежемесячные и ежедневные значения OLR, локализированные в пространственном и временном диапазонах землетрясений. Для анализа предложенных событий были взяты ежемесячные и ежедневные данные радиометра высокого разрешения (AHRR) с веб-сайта центра прогнозирования климата NOAA.

Ежемесячное среднее значение [90° N – 90° S (1°×1°), 0° E – 357.5° E (1°×1°)] по данным спутника NOAA-17 были использовано для изучения аномальной изменчивости OLR в зоне землетрясения (5°×5°):

$$S_m^* = S(x_{i,j}, y_{i,j}) - S(x_{i-1,j}, y_{i,j}) - S(x_{i,j}, y_{i,j-1}) - S(x_{i+1,j}, y_{i,j}) - S(x_{i,j}, y_{i,j+1}), \quad (1)$$

здесь S_m^* - месячное аномальное поле, $S(x_{i,j}, y_{i,j})$ – среднемесячное значение , x – широта, y – долгота и i, j – привязка к точке на карте.

Суточное среднее значение [90° N - 90° S (1° × 1°), 0° E - 357,5° E (1° × 1°)] по данным спутников NOAA - 14, 15, 16 было использовано для вычисления суточной зональной аномалии OLR над эпицентральной областью (1°×1°). С учетом пренебрежения продольных независимых вариаций, исключив зональное среднее в области 10° над эпицентром, дневное поле вихря вычисляется:

$$S_d^*(x_{i,j}, y_{i,j}, t) = S(x_{i,j}, y_{i,j}, t) - S(y_{i,j}, t), \quad (2)$$

здесь S_d^* – дневное аномальное поле, $S(x_{i,j}, y_{i,j}, t)$ – дневное среднее значение, $S(y_{i,j}, t)$ – зональное среднее.

Зональная аномалия OLR вычисляется как отклонение текущего среднего значения от многолетних средних зональных значений над эпицентром землетрясения:

$$\Delta OLR(t)^A = S^*(x_{i,j}, y_{i,j}, t) - \bar{S}^*(x_{i,j}, y_{i,j}, t), \quad (3)$$

здесь $t = 1, K$ – номер дня, $S^*(x_{i,j}, y_{i,j}, t)$ – текущее значение OLR, $\bar{S}^*(x_{i,j}, y_{i,j}, t)$ – среднее значение OLR, рассчитанное по данным за несколько лет.

Анализ непрерывного OLR указывает на значительную аномальную изменчивость до появления землетрясений с магнитудой от 5 баллов. Ежедневные и ежемесячные данные использовались для различения глобальной, сезонной и временной локальной аномалий.

На рис. 1 представлено распределение OLR за декабрь 2000 года и январь 2001 года для землетрясения в Бхудж, Гуджарат, Индия, произошедшего 26 января. Магнитуда составила 7.9 баллов. В декабре наибольшее значение OLR было зафиксировано вблизи эпицентра предстоящего события и составило 288,8 Вт/м². В январе отклонение было обнаружено в Северной Индии, вероятно, связанное с повышением выделения газа на границах платформы, вызванное деформацией земной коры. На рис. 2 представлены результаты расчета средних зональных значений над эпицентральной областью с учетом стандартного отклонения. Были выделены три аномальные области OLR: начиная с 20 декабря, 10 января и 21 декабря. Наибольший положительный прирост составил +6 Вт/м² и находился над эпицентральной областью (23° N, 70° E) за пять дней до события.

Таким образом, комплексный анализ OLR данных показал существование аномального длинноволнового излучения до момента сильного землетрясения (с магнитудой от 5 баллов). Процесс начинается над зоной главных тектонических разломов с радиусом около 2,5° и более вокруг эпицентра приблизительно за месяц до сейсмического события. Месячный максимум аномального поля OLR наблюдался в пределах смещения менее 2,5° по широте и долготе над эпицентром.

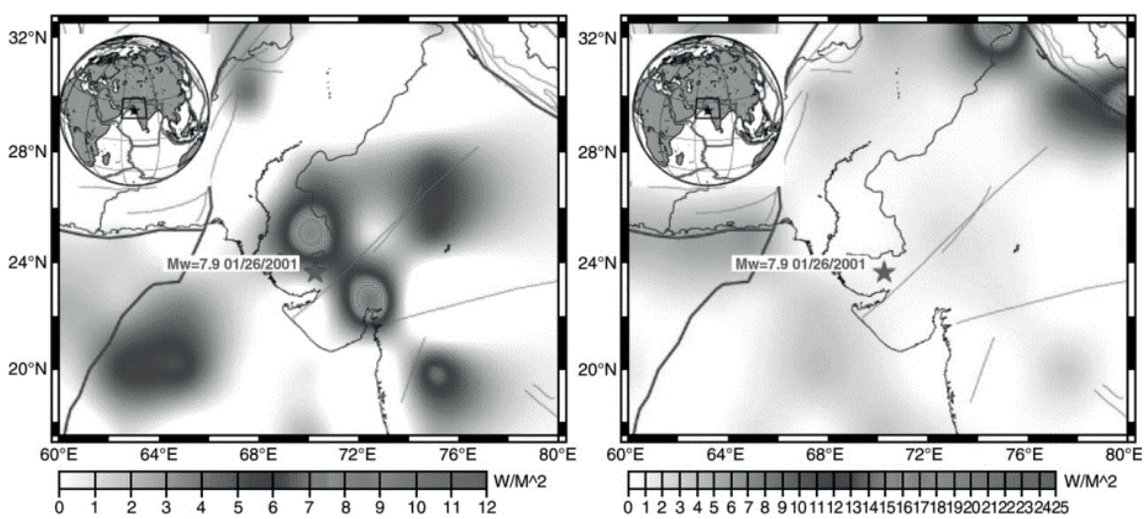


Рис. 1. Карта месячных изменений OLR за декабрь 2000 года (а) и месячные изменения OLR за январь 2001 года для землетрясения в Бхудж, Гуджарат, Индия (26.01.2001, M 7.9 баллов). Эпицентр (23.63° N, 70.24 ° E) отмечен звездой, границы тектонических плит и основные разломы выделены черным цветом

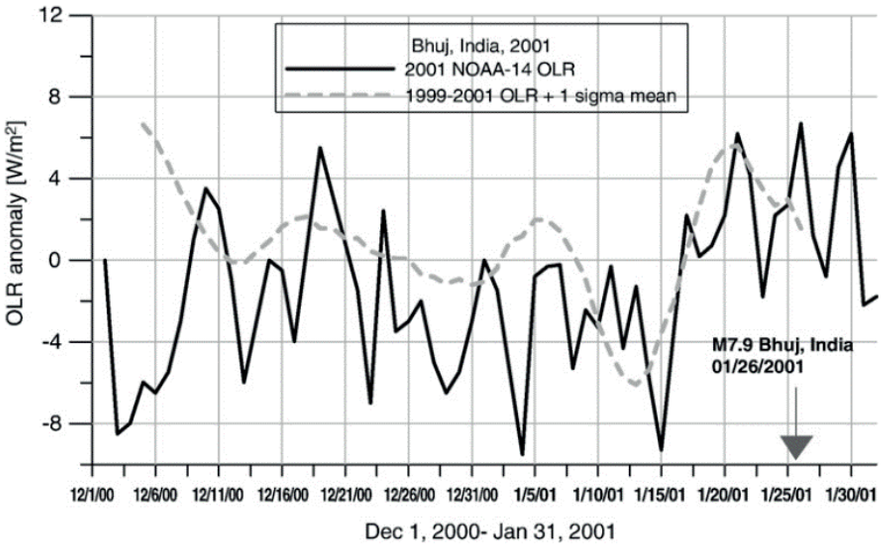


Рис. 2. Данные OLR за период с 1 декабря 2001 года по 31 января 2001 года над эпицентром землетрясения (23.63° N, 70.24 ° E) для землетрясения Бхудж, Гуджарат, Индия (26.01.2001, M 7.9 баллов)

Литература

1. *Пулинец С.А., Узунов Д.П., Карелин А.В., Давиденко Д.В.*, Физические основы генерации краткосрочных предвестников землетрясений. Комплексная модель геофизических процессов в системе литосфера–атмосфера–ионосфера–магнитосфера, стимулируемых ионизацией // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. В. 55. С. 521–538.
2. *Ouzounov D., Liu D., Chunli K., Cervone G., Kafatos M., Taylor P.* Outgoing long wave radiation variability from IR satellite data prior to major earthquakes // Tectonophysics. 2007. V 431. P. 211–220.
3. *Pulinets, S.A., Boyarchuk, K.A. Ionospheric.* Precursors of Earthquakes. Berlin: Springer, 2004. 316 p.
4. *Pulinets S., Ouzounov D., Ciraolo L., Singh R., Cervone G., Leyva A., Dunajecka M., Kareli, Boyarchu, K.* Thermal, atmospheric and ionospheric anomalies around the time of Colima M7.8 Earthquake of January 21, 2003. // Annales Geophysicae. A. 2006. V. 24. P. 835–849.
5. *Pulinets S., Ouzounov D., Karelin A., Boyarchuk K., Pokhmelnykh L.* The physical nature of thermal anomalies observed before strong earthquakes // Physics and Chemistry of the Earth. B. 2006. V. 31. P. 143–153.

УДК 550.3+551.5:629.78

Анализ экваториальной асимметрии распределения составляющих радиационного баланса Земли по данным длительных космических наблюдений

В.А. Головко[1,2], А.А. Нестеров[2]

[1]ФГБУ «НИЦ Планета»

[2]Московский физико-технический институт (государственный университет)

С начала эры космической климатологии (с 1970-х) системы наблюдений (ERBE, СРРБ, CERES) фиксируют положительные значения радиационного дисбаланса Земли. Текущая оценка глобального дисбаланса составляет около +0.7 Вт/м^2. Это означает, что Земля получает энергии от Солнца больше, чем обратно её излучает в космическое пространство, т.е. постепенно нагревается [1]. В течение последних десятилетий, когда факт глобального потепления стал очевиден даже для скептиков, было детектировано и смещение характерных особенностей циркуляции атмосферы к полюсам.

Основные факты, сопутствующие глобальному потеплению, в частности: увеличение концентрации парниковых газов, рост приземной температуры, интенсивное

таяние ледников и повышение уровня мирового океана, укладываются в логически понятную цепочку причинно-следственных связей. Но есть взаимосвязи, порождающие вопросы, ответы на которые не столь очевидны и требуют более детальных исследований. Например, почему темпы глобального потепления для северного полушария значительно выше, чем для южного, почему изменяется конфигурация ячеек циркуляции и динамика струйных течений в атмосфере, как и почему меняется структура облачного покрова? В связи с этим возникает и самый главный вопрос, как всё это в конечном итоге влияет на радиационный дисбаланс Земли и перспективу интенсификации глобального потепления.

Характеристики циркуляции атмосферы и облачного покрова тесно взаимосвязаны. Упрощенно атмосферная циркуляция в экваториальной области представима двумя основными особенностями. Первая – это крупномасштабные структуры, называемые ячейками Хэдли, в которых воздух стремительно поднимается во внутритропической зоне конвергенции (ВЗК), перемещается на больших высотах по направлению к полюсам и снова опускается к поверхности в субтропических регионах. Вторая особенность – очень сильные потоки воздуха, известные как струйные течения, которые протекают с запада на восток в средних широтах каждого полушария. Меандры струйных потоков создают штормовые треки, которые формируют основные метеорологические процессы в средних широтах.

Стремительно совершенствующаяся аппаратура глобальных космических наблюдений за составляющими климатической системы является источником огромных потоков ценной информации. К числу таких наиболее важных информационных источников в первую очередь можно отнести данные, полученные с помощью действующих космических средств наблюдений CERES (Clouds and Earth Radiant Energy System) и CLOUDSAT. И если система CERES предоставляет уже длительное время в основном информацию об энергетических потоках на верхней границе атмосферы (ВГА), в частности, о составляющих радиационного баланса Земли (РБЗ), то CLOUDSAT, благодаря установленному на нем мощному радару, позволил вести непрерывный глобальный мониторинг характеристик облачного покрова во всей толще атмосферы Земли. Анализ больших объёмов накопленных данных даёт возможность уже сейчас ответить, хотя бы частично, на некоторые из перечисленных выше вопросов.

В докладе приводятся результаты анализа длительных рядов космических наблюдений системами CERES и CLOUDSAT применительно к выявлению пространственно-временной эволюции составляющих радиационного баланса и облачного покрова Земли. Основу анализа представляют исследования процессов формирования различного типа облаков, определяемых их высотной локализацией. Ключевую роль в выяснении генезиса облачного покрова играют уникальные данные CLOUDSAT. Эти данные наглядно показывают, что в узкой области ВЗК в районах мощных восходящих потоков воздуха формируются высокие вертикально-протяженные облака. В области же нисходящих потоков в субтропической зоне формируются обширные поля низких облаков, причем в южном полушарии эти поля являются более протяженными и толстыми, нежели в северном. При этом штормы, сопутствующие струйным потокам, формируют глубокие, высокие облака, простирающиеся по всей тропосфере Земли. Важно отметить, что низкие и высокие облака приводят к различным воздействиям на климат. Низкие облака в основном отражают солнечную радиацию и охлаждают поверхность. Напротив, высокие облака, как правило, оказывают эффект потепления на поверхности и в атмосфере Земли.

Независимый анализ многолетних данных CERES подтверждает выводы, полученные на основе информации CLOUDSAT. Согласно этому результату характеристики циркуляции атмосферы в ходе глобального потепления меняются: постепенно ячейки Хэдли расширяются, так что края ячеек (с нисходящими потоками воздуха) перемещаются к полюсам. Это означает, что в ходе глобального потепления тропики расширяются [2].

Важный климатический эффект проявляется в том, что когда границы ячеек Хэдли движутся к полюсам, то одновременно в том же направлении сдвигаются и поля высокой плотной облачности. И хотя ячейки расширяются как в северном полушарии, так и в южном, результирующее влияние трансформированной облачности в них разное. В

северном полушарии расширение полей высокой облачности способствует уменьшению экранирующего эффекта на солнечное излучение и тем самым обеспечивается дополнительный нагрев поверхности. В южном же полушарии влияние расширяющихся полей высоких облаков уравновешивается влиянием уже имеющихся обширных низких облачных слоев, что в конечном итоге блокирует больше солнечного света и способствует небольшому поверхностному охлаждению.

Рассматриваемые эффекты напрямую связаны с адекватной оценкой чувствительности климата по отношению к разным возмущающим факторам. Правильное представление этих особенностей в климатических моделях имеет решающее значение для определения того, насколько глобальное потепление будет зависеть от эмиссии парниковых газов и насколько от радиационного влияния облачности (РВО). Многие климатические модели пока не учитывают текущее расширение ячеек Хэдли.

Важность проводимых исследований пространственно-временной эволюции составляющих радиационного баланса и облачного покрова Земли в период глобального потепления заключается в том, что это позволяет уточнить сложные взаимосвязи характеристик облачности и радиации и тем самым более адекватно учитывать выявляемые особенности при совершенствовании современных климатических моделей.

Литература

1. *Головко В.А*. Энергетические аспекты изменения климата Земли: взгляд из космоса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 5. С. 140–154.
2. *Loeb N.G.* [*et al*.]. Observational constraints on atmospheric and oceanic cross-equatorial heat transports: revisiting the precipitation asymmetry problem in climate models // Clim Dyn. 2016. V. 46. P. 3239–3257.

УДК 551.510

Анализ сезонной и долговременной изменчивости параметров ВРО над Южным полюсом

Г.М. Крученицкий[1,2]***, К.А. Статников***[2]

[1]Центральная аэрологическая обсерватория
[2]Московский физико-технический институт (государственный университет)

Вертикальное распределение озона (ВРО) в атмосфере является одним из важнейших показателей состояния озонового слоя Земли. Его сезонная и долговременная эволюции представляют собой предмет мониторинга измерительными средствами баллонного и космического базирования, и результаты таких измерений совершенно необходимы для диагностики причин наблюдаемой эволюции состояния озоносферы. Однако, описание пространственной и временной изменчивости поля ВРО сложнее, чем, к примеру, поля общего содержания озона (ОСО). ОСО в конкретной точке в заданный момент времени описывается числом, в то время как ВРО – функцией высоты (профилем).

В настоящей работе исследуется сезонная и долговременная изменчивость вертикального распределения концентрации озона над Южным полюсом – в самом центре т.н. «антарктической озоновой дыры». Сезонная изменчивость была исследована по двум причинам:

- для количественного учета её вклада в формирование весенней антарктической озоновой аномалии (ВОАА);
- ввиду важности в условиях т.н. «глобального потепления» учета вклада озона в парниковый эффект в условиях полярной ночи.

Рабочая гипотеза состояла в том, что долговременное изменение ВРО не сводится к однонаправленным изменениям (трендам), а представляет собой долгопериодное колебание – параметрический резонансный отклик [1] на самую низкочастотную составляющую приливного процесса ($LT = 18.613$ лет). Для тестирования рабочей

гипотезы были использованы данные баллонного зондирования на станции SouthPole [2]. Основной задачей работы было сравнение эффективности моделей тренда и параметрического резонанса для долговременной изменчивости концентрации озона на различных высотах и диагностика по результатам сравнения причин долговременной изменчивости АРКО.

Концентрация озона $n_3(h,t)$ на каждом из высотных уровней от 3 до 33 км исследовалась на предмет сезонной ($n_S(h,t)$) и долговременной изменчивости ($n_{LT}(h,t)$) $n_3(h,t) = n_S(h,t) + n_{LT}(h,t) + \mathrm{Rez}(h,t)$:

$$n_S(h,t) = \sum_{k=0}^{n}[a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t)] + \mathrm{Rez}_Y(t), \quad (1)$$

где $\omega = \frac{2\pi}{T_Y}$; $T_Y = 365.24$ суток – период первой гармоники годового хода; $\mathrm{Rez}_Y(t)$ – остатки сезонного хода; $\mathrm{Rez}_Y(t) = n_{LT}(h,t) + \mathrm{Rez}(t)\mathrm{Rez}(t)$ – окончательные остатки моделирования, а модель долговременной изменчивости выбиралась из двух вариантов:

$$n_{LT}(h,t) = \sum_{2=0}^{4}[A_k \cos\left(\frac{\omega t}{kLT}\right) + B_k \sin\left(\frac{\omega t}{kLT}\right)], \quad (2а)$$

$$n_{LT}(h,t) = \alpha t + \beta. \quad (2б)$$

Результаты моделирования сезонной изменчивости ВРО представлены на рис. 1, а результаты моделирования сезонной изменчивости на рис. 2. Приведенные результаты параметризации профилей ВРО подтверждают ту точку зрения, что предполагаемый антропогенный вклад в долговременную изменчивость состояния озоносферы находится за пределами обнаружимости современными средствами измерения ВРО как баллонного, так и спутникового базирования, а основной вклад в эту изменчивость вносится параметрическим резонансом с приливными явлениями с периодом 18.6 лет [3].

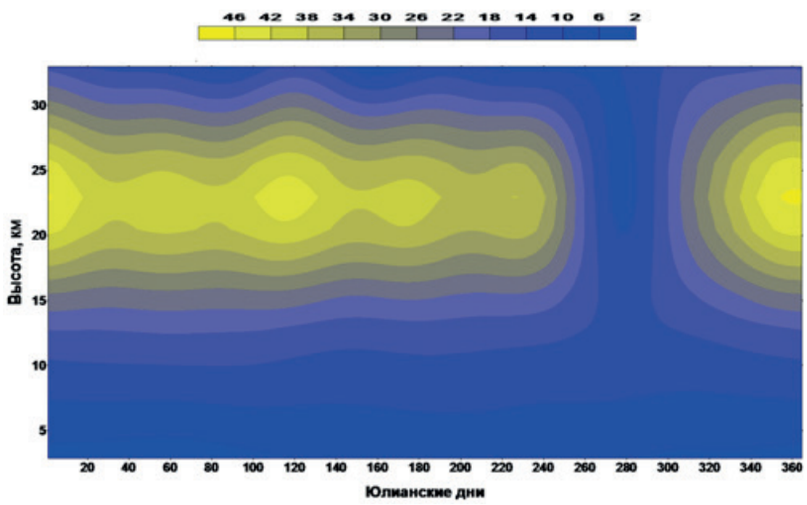


Рис. 1. Высотно-временной разрез сезонной изменчивости концентрации озона (10^{11} см$^{-3}$) над Южным Полюсом

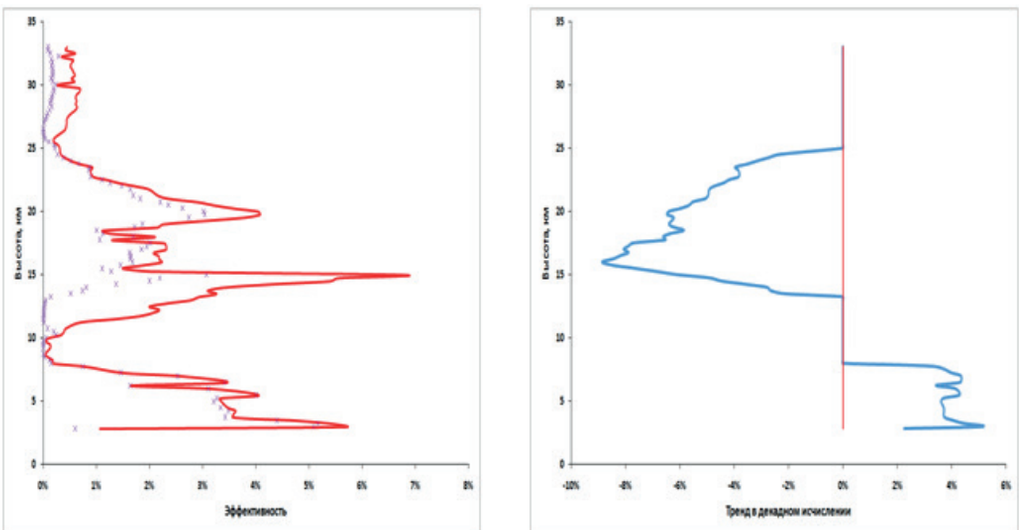


Рис. 2. Эффективности моделей (2a линия) и (2b крестики) слева, а также тренды остатков модели сезонности (синяя) и полной модели (красная) справа

Литература

1. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Механика. М.: Физматгиз, 1958. с. 103–109.
2. http://www.woudc.org/data/explore.php.
3. *Kruchenitsky G.M., Statnikov K.A.* Ozone Proble: Final Solution // Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics. 2017. V. 15. N 2. P. 79–83.

УДК 551.5: 620.92

Верификация спутниковых данных о поступлении солнечной радиации применительно к моделированию фотоэлектрических установок

***Ю.В. Дуфлот*[1, 2], *С.Е. Фрид*[2]**

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2]Объединённый институт высоких температур РАН

Наземные актинометрические измерения обеспечивают достоверные данные, по своей номенклатуре практически достаточные для проведения оценок производительности солнечных установок. Проблемой является малое количество актинометрических станций на территории России. Для решения проблемы недостаточности наземных данных о поступлении солнечной энергии, основанной на спутниковых данных, предлагается использование базы NASA POWER [1].

Целью работы была верификация данных по солнечной радиации базы данных NASA POWER по наземным данным. Так как известно [2], что данные спутниковых наблюдений начинают расходиться с наземными в высокоширотной области, то особый интерес представляла оценка погрешности в зависимости от изменения географической широты (при схожих значениях долготы).

Для изучения данной зависимости были выбраны наземные станции в следующих городах: Москва (55°42'N 37°30'E), Санкт-Петербург (59°58'N 30°18'E), Архангельск (64°35'N 40°30'E).

Расчеты проводились для упрощенной модели фотоэлектрической установки по данным тех лет, в которых отсутствовали пропуски. Все элементы схемы считались идеальными: выходная мощность фотобатареи характеризовалась только ее пиковой мощностью, саморазряд аккумулятора не учитывался. Схема установки представлена на рис. 1.

Для решения поставленной задачи были построены серии зависимостей (для различных значений доли покрытия нагрузки) отношений пиковой мощности фотобатареи от емкости аккумулятора к пиковой мощности нагрузки.

В ходе работы было выяснено, что погрешность при расчете установки по базе данных NASA POWER составляет более 50% относительно расчета по наземным измерениям. Полученный результат ставит под сомнение использование этих данных для моделирования установок в высокоширотной области.

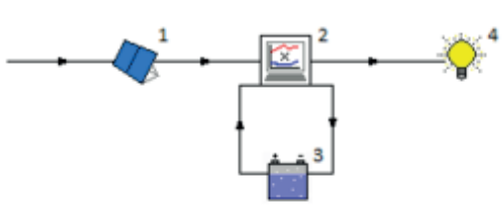


Рис. 1. Схема моделируемой установки: 1 – фотобатарея, 2 – контроллер, 3 – аккумуляторная батарея, 4 - нагрузка

Литература

1. NASA's Prediction of Worldwide Energy Resource // Project 2017. https://power.larc.nasa.gov/
2. *Фрид С.Е., Попель О.С., Лисицкая Н.В., Киселева С.В.* Обобщенные зависимости повторяемости индекса ясности для территории Российской федерации // Доклады академии наук. 2017. Т. 474. С. 293–295.

УДК 551.5

Долговременная эволюция астрономических факторов, формирующих энергетический баланс климатической системы Земли

***Е.С. Зворыгина*[1], *Г.М. Кручеицкий*[1,2]**

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2]Центральная аэрологическая обсерватория

К астрономическим факторам, формирующим основной вклад в энергетический баланс климатической системы Земли (его приходную часть), относятся расстояние между Землей и Солнцем и деформация фотосферы. Первый из этих факторов испытывает долговременную эволюцию, описываемую возмущениями, вносимыми в законы Кеплера наличием других планет в Солнечной системе, а второй обусловлен деформацией диаграммы направленности излучения Солнца ввиду отклонений барицентра Солнечной системы от центра Солнца, которые могут достигать размеров, превосходящих диаметр Солнца (рис.1) [1]. Необходимые расчеты выполнены по данным [2], с учетом соображений, изложенных в [3]. На основе этих расчетов выполнена оценка вклада естественных факторов в т.н. «глобальное потепление» и правдоподобие антропогенных причин его происхождения.

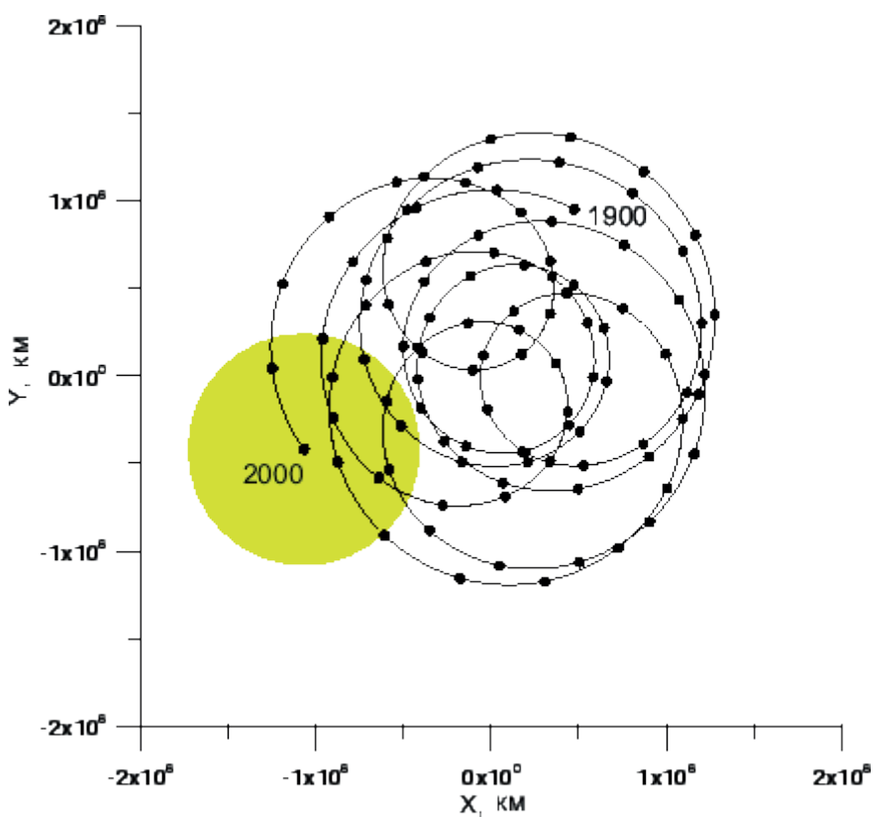


Рис. 1. Долговременная эволюция положения барицентра Солнечной системы

Литература

1. *Долгачев В.П., Доможилова Л.М., Хлыстов А.И.* Некоторые свойства барицентрического движении больших планет и Солнца // Тр. ГАИШ. Т. 62. С. 111–118.
2. *Мюррей К., Дермонт С.* Динамика солнечной системы. М.: Физматлит, 2010, С. 528–531.
3. *Дворецкая И.В. и др*. Астрономические факторы в долговременной эволюции климата Земли. Оптика атмосферы и океана. 1914. Т. 27, № 2. С. 139–149.

УДК 551.5

Долговременная эволюция локальной температуры в начальной фазе эпохи «глобального потепления»

***М.Г. Калацкий*[1], *Г.М. Крученицкий*[2]**

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2]Центральная аэрологическая обсерватория

Исследована изменчивость приземной температуры в ближнем Подмосковье в период 1879–1960 гг. Установлено, что наряду с сезонной изменчивостью (рис. 1) эта температура обладает и долговременной изменчивостью, оценивание которой с помощью тренда дает результаты близкие к полученным экспертами IPCC [1], несмотря на то, что уровень антропогенных выбросов углекислого газа в атмосферу, которым упомянутые эксперты объясняют существование тренда, несопоставим с тем, который имел место в последующие 40 лет. В то же время описание долговременной изменчивости с помощью долговременных колебаний естественного происхождения повышает эффективность моделирования этой изменчивости почти в два раза и обращает остатки модели в белый шум (рис. 2).

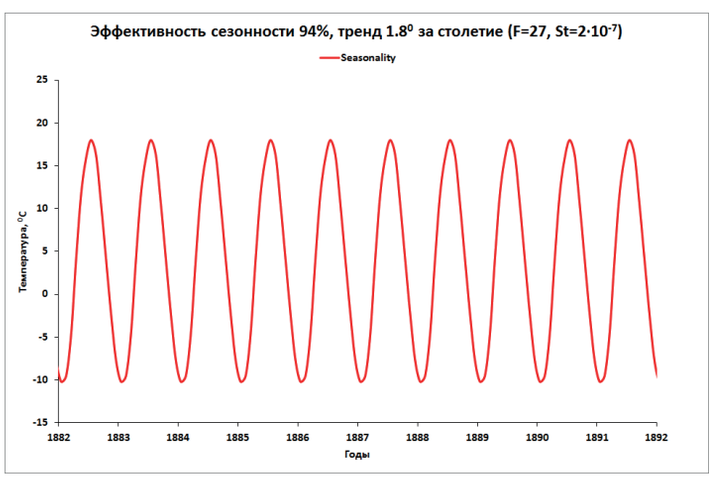


Рис. 1. Сезонная изменчивость подмосковной температуры

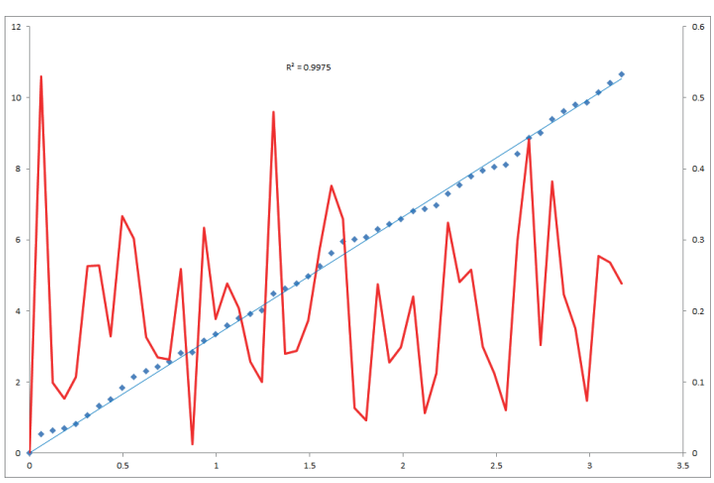


Рис. 2. Интегрированная периодограмма остатков полной модели

Литература

1. Third Assessment Report. Climate Change 2001 (http://www.ipcc.ch/).

УДК 551.5

Моделирование сезонной и долговременной изменчивости снежного покрова на территории СКФО и ЮФО РФ

***Р.А. Шокуев*[1], *Г.М. Кручеицкий*[1,2]**

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2]Центральная аэрологическая обсерватория

Цель работы: исследовать сезонную и долговременную изменчивость толщины снежного покрова (ТСП) на территории СКФО и ЮФО РФ, пространственное распределение параметров, определяющих эту изменчивость, и изучить возможность использования полученных результатов в приложениях:

- с.–х. метеорология;
- климатология;
- калибровочное обеспечение оптической аппаратуры космического базирования.

Задачи:

- подготовить данные о ТСП в форматах, удобных для обработки;
- построить регрессионные модели для сезонной и долговременной изменчивости и поля распределения параметров этих моделей;
- разработать средства визуализации полученных результатов.

В данной работе проанализированы подекадно осредненные данные о толщине снежного покрова, полученные в период с 1960–2012 гг. на метеостанциях Южного и Северокавказского федеральных округов России. К сожалению, исходные данные содержат большое число лакун, что естественно вносит заметный вклад в вычисление параметров изменчивости, особенно сезонной. Эти параметры вычислялись на основе построения регрессионной модели. Число гармоник в модели ограничено семью из следующих соображений: теорема Котельникова требует не менее двух отсчетов на период, однако она справедлива лишь при бесконечном значении соотношения сигнал/шум. Поэтому мы тестируем гармоники, имеющие не менее трех отсчетов на период, т.е. не более высокие чем седьмая. В регрессионной модели значения коэффициентов, вычисленных методом наименьших квадратов, тестировались по критерию Стьюдента, и те, надежность которых составляла менее 95%, полагались равными нулю.

УДК 519.63+523.68

Моделирование соударений осколков метеорного тела на сверхзвуковых скоростях

В.Т. Лукашенко[1,2,3], Ф.А. Максимов[1,2]

[1]Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
[2]Институт автоматизации проектирования РАН
[3]Вычислительный центр им. А.А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН

При распаде метеорного тела образуется система тел – осколков метеорного тела. Моделирование поведения подобной системы является важной задачей для понимания динамики полета метеороида в атмосфере. В [1] предложен метод расчета течения около системы тел с построением отдельных сеток для расчета вязко-невязкого течения вблизи обтекаемых тел. В [2] представлена адаптация и результаты использования этого метода для решения сопряженной задачи, когда аэродинамическая и баллистическая задачи решаются параллельно. Для фиксированного момента времени t решается задача обтекания. Учитывается относительное положение тел, но не учитываются различия в скорости разных тел. Полагается, что все тела имеют преобладающую скорость $V^t_{cp.}$ вдоль некоторого направления Ox. После этого происходит переход к решению баллистической задачи. Рассчитывается положение системы через некоторый малый промежуток времени Δt. Каждое тело i с массой m_i сдвигается в соответствии с собственной скоростью $\overline{V_i} = \left(V^t_{x,i}, V^t_{y,i}\right)$, имеющей некоторое отклонение от преобладающей скорости общего движения, и действующей на него аэродинамической силе $\overline{F_i} = \left(F^t_{x,i}, F^t_{y,i}\right)$:

$$X_i^{t+\Delta t} = X_i^t + (V_{x,i}^t - V_{cp.}^t)\Delta t, \quad V_{x,i}^{t+\Delta t} = V_{x,i}^t + \frac{F_{x,i}^t}{m_i}\Delta t, \quad Y_i^{t+\Delta t} = Y_i^t + V_{y,i}^t \Delta t, \quad V_{y,i}^{t+\Delta t} = V_{y,i}^t + \frac{F_{y,i}^t}{m_i}\Delta t. \tag{1}$$

Таким образом, конфигурация системы изменяется со временем, что часто приводит к сближению и столкновению тел. В представленной работе приводится алгоритм для моделирования подобного соударения между телами. Если тела имеют форму круговых цилиндров с радиусами R_i и R_j, то соударение между i-м и j-м телом происходит при

$$\sqrt{\left(X_i - X_j\right)^2 + \left(Y_i - Y_j\right)^2} < R_i + R_j + C, \tag{2}$$

где константа C подбирается в зависимости от размера сеток тел, а также заданного максимального смещения тел за шаг времени Δt.

Существует две различные модели столкновения твердых тел: абсолютно упругий удар и абсолютно неупругий удар. При абсолютно упругом ударе кинетическая энергия тел сохраняется, при абсолютно неупругом ударе тела слипаются и движутся как единое целое. На этой основе можно взять упрощенную концепцию. Пусть неупругий удар тел – это столкновение при котором происходит осреднение скоростей сталкивающихся тел согласно закону сохранения импульса, однако тела не слипаются. Тогда формулы для изменения скоростей тел запишутся как:

$$\Delta V_i = \frac{(k+1)m_j\left(V_{l\,j} - V_{l\,i}\right)}{m_i + m_j}, \qquad \Delta V_j = \frac{(k+1)m_i\left(V_{l\,i} - V_{l\,j}\right)}{m_i + m_j}, \tag{3}$$

где $V_{l\,i}$ и $V_{l\,j}$ – соответствующие проекции скоростей на направление соударения l, а параметр k отвечает за потерю кинетической энергии. При $k = 1$ происходит абсолютно упругий удар, при $k = 0$ происходит абсолютно неупругий удар.

Данный метод моделирования динамики с учетом соударений (1–3) применен для решения задачи о сверхзвуковом полете системы из двух одинаковых тел, расположенных вдоль потока, и при смещении сзади расположенного тела в боковом направлении (рис. 1).

Показано, что при смещении на заднее тело будет действовать не только продольная, но и боковая сила. Это приводит к всасыванию отстающего тела в след лидирующего тела – эффекту коллимации [3]. На рис. 2 приведены рассчитанные относительные траектории отстающего тела при его различном начальном положении. Для расчетов соударений бралась модель абсолютно упругого удара. Видно, что эффект коллимации может приводить к столкновению (единичному – траектории 1, 2, 4; или двойному – траектория 3) и последующему разлету тел, либо к перестройке конфигурации с переменой тел местами (траектория 5).

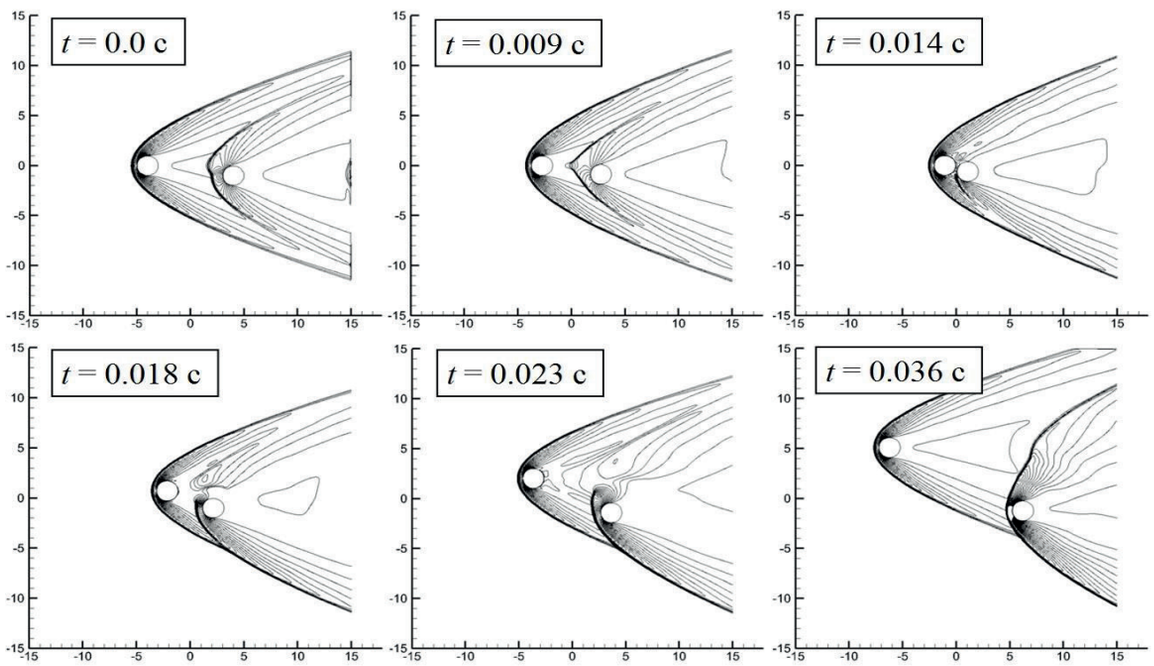


Рис. 1. Абсолютно упругое соударение двух железных тел при числе Маха M = 6. Последовательные картины изолиний давления

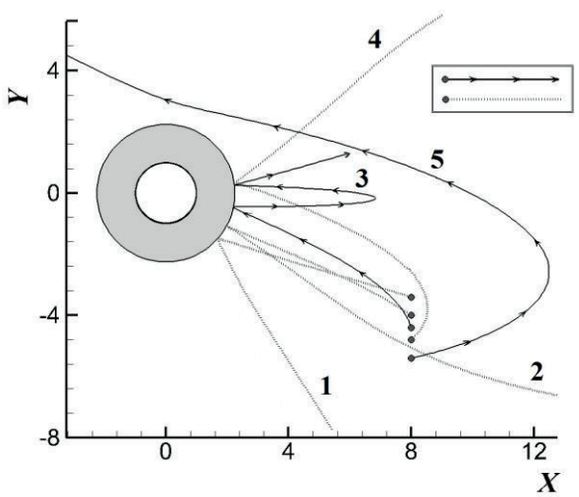


Рис. 2. Траектории движения изначально отстающего тела по отношению к лидирующему при различных положениях. Серым цветом показана область соударений

Литература

1. *Максимов Ф.А.* Сверхзвуковое обтекание системы тел // Компьютерные исследования и

моделирование. 2013. Т. 5. № 6. С. 969–980.
2. Лукашенко В. Т., Максимов Ф. А. Математическая модель разлета осколков метеорного тела после разрушения // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. Вып. 9.
3. *Барри Н.Г.* Аэродинамика фрагментов метеорного тела. Эффект коллимации // Астрономический вестник. 2010. Т. 44. № 1. С. 59–64.

УДК 519.63

Математическое моделирование взаимодействия ударной волны с подвижным цилиндром

Д.А. Сидоренко[1,2], П.С. Уткин[1,2], Ф.А. Максимов[1]

[1]Институт автоматизации проектирования РАН
[2]Московский физико-технический институт (государственный университет)

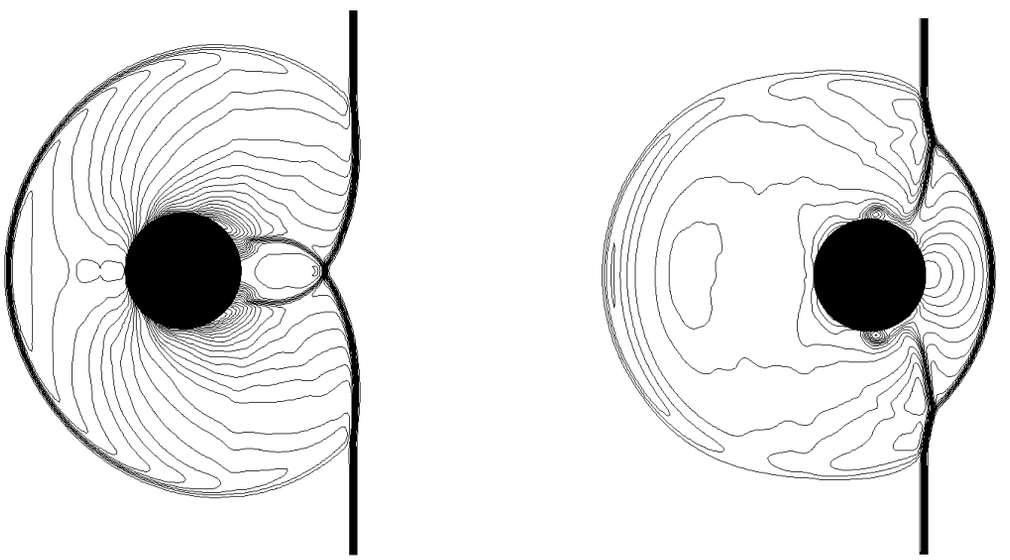
Множество фундаментальных и прикладных задач механики быстропротекающих физико-химических процессов связано с необходимостью решения определяющей системы уравнений в области с изменяющейся геометрией. Примерами могут служить подвижные тела в области, например, в случае движения снаряда по каналу ствола в задаче внутренней баллистики или движения частицы за проходящей ударной волной. Целью работы является разработка и тестирование вычислительного алгоритма метода декартовых сеток для моделирования двумерных течений с ударными волнами в областях с изменяющейся геометрией, а также его применение для исследования задачи взаимодействия ударной волны с подвижным телом цилиндрической формы.

На основе подхода, описанного в [1], разработан и программно реализован алгоритм второго порядка аппроксимации по пространственным переменным для численного интегрирования двумерной системы уравнений Эйлера на декартовых сетках в областях с подвижными границами. Реализованный алгоритм был протестирован на модельных задачах [1–3] о заданном движении тел в газе, а также о движении тел под действием сил давления.

С использованием разработанного алгоритма и программы была рассмотрена задача о взаимодействии ударной волны с цилиндром, способным двигаться под действием сил давления. Некоторые аспекты данной проблемы обсуждаются в [2]. С целью исследования влияния массы цилиндра на характер его движения и картину дифракции падающей ударной волны с фиксированным числом Маха была проведена серия параметрических расчетов. В динамике движения цилиндра была выявлена особенность, заключающаяся в возникновении минимума его ускорения. Также получены качественно различные ударно-волновые картины течений для цилиндров различной массы. Картина течения при взаимодействии ударной волны с цилиндром относительно большой массы аналогична ситуации взаимодействия ударной волны с неподвижным цилиндром (см. рис. 1а). При уменьшении массы цилиндра картина течения начинает меняться: движение цилиндра создает уплотнение газа перед ним и разрежение за ним. При некотором соотношении между массой цилиндра и числом Маха падающей волны граница области сжатого перед цилиндром газа превращается в ударную волну (см. рис. 1б).

Были сопоставлены картины течения при дифракции УВ на тяжелом подвижном цилиндре в рамках модели Эйлера и разработанной методики декартовых сеток (см. рис. 1а), с одной стороны, и при дифракции УВ на неподвижном цилиндре в рамках модели Навье–Стокса и методики [4], с другой (см. рис. 2). Во втором случае моделирование осуществляется на наборе сеток. Основная сетка с регулярными прямоугольными ячейками используется для моделирования внешнего невязкого течения. Около тела строится специальная сетка со сгущением узлов к поверхности тела. На данной сетке решаются уравнения Навье–Стокса в приближении тонкого слоя, что позволяет построить решение с учетом вязкого слоя на поверхности тела. На внешней границе данной сетки с помощью интерполяции решения на двух сетках сшиваются.

Вязкость потока на малых временах взаимодействия (волна проходит 1÷2 диаметра цилиндра) не оказывает существенного влияния на поле течения и проявляется только со временем. На рис. 2 приведены картины течения около неподвижного цилиндра в момент времени t, соответствующий рис. 1а, а также в момент времени $2t$. В следе за обтекаемым телом формируются вихревые структуры, характерные для вязкого течения.



а) б)

Рис. 1. Изолинии плотности газа при движении цилиндра за проходящей ударной волной под действием сил давления. Слева – тяжелый цилиндр, безразмерная масса 2.0; справа – легкий, безразмерная масса 0.02. Число Маха падающей волны 1.5

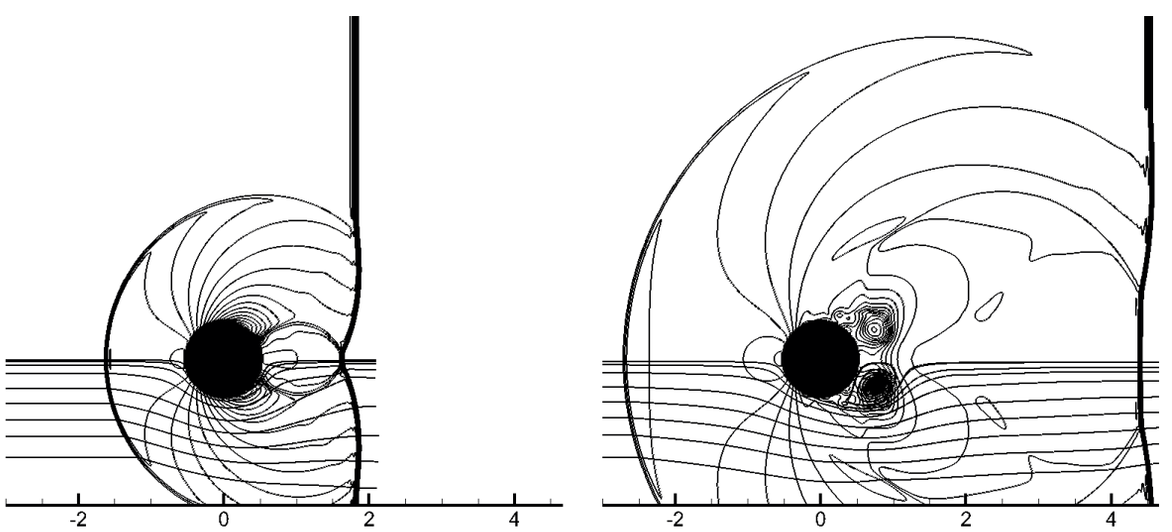


Рис. 2. Изолинии плотности газа и линии тока около неподвижного цилиндра за проходящей ударной волной. Число Маха падающей волны 1.5

Литература

1. *Chertock A., Kurganov A.* A simple Eulerian finite-volume method for compressible fluids in domains with moving boundaries // Commun. Math. Sci. 2008. V. 6. N 3. P. 531.
2. *Luo K., Luo Y., Jin T., Fan J.* Studies on shock interactions with moving cylinders using immersed boundary method // Phys. Rev. Fluids. 2017. V. 2. P. 064302.
3. *Tan S., Shu C.-W.* A high order moving boundary treatment for compressible inviscid flows // J. Comp. Phys. 2011. V. 230, I. 15. P. 6023.
4. *Максимов Ф.А.* Сверхзвуковое обтекание системы тел // Компьютерные исследования и

моделирование. 2013. Т. 5, № 6. С. 969.

УДК 519.63

Аэродинамическое сопротивление звездообразного тела в сверхзвуковом потоке

Д.А Андреев, Ф.А. Максимов

Институт автоматизации проектирования РАН
Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова

Тела звездообразной формы имеют меньшее аэродинамическое сопротивление, чем эквивалентные по объему тела вращения (конуса). Это обусловлено тем, что при использовании звездообразной формы обеспечивается меньший местный угол атаки элементов поверхности тела по сравнению с эквивалентным конусом. В соответствии с теорией Ньютона, на поверхности звездообразного тела будет реализовываться меньшее давление. Данный факт подтверждается экспериментальными исследованиями [1]. Вместе с тем в теории Ньютона есть существенные предположения: не учитываются трение, толщина пограничного слоя и интерференции между лопастями, и реальное снижение аэродинамического сопротивления меньше теоретического. В связи с этим представляет интерес создание методов, позволяющих рассчитать аэродинамические свойства звездообразных тел с учетом всех особенностей. Наиболее предпочтительным подходом является решение задачи обтекания на основе уравнений Навье–Стокса. Однако данный подход имеет большие сложности. В данной работе моделирование течения осуществляется в рамках модели невязкого газа на основе уравнений Эйлера [2]. Это позволяет рассчитать волновое сопротивление, а сопротивление трения и донное сопротивление оценивается методами, используемыми в инженерной практике [3]. Целью работы является разработка и тестирование метода расчета полного аэродинамического сопротивления звездообразного тела. Результаты расчетов сравниваются с экспериментом, приведенным в [1].

Геометрические параметры моделей звездообразных тел следующие: количество лепестков $n = 4$ и $n = 6$, симметрично расположенные относительно продольной оси модели, угол между передней кромкой лепестка и продольной осью модели одинаков и равен $\beta = 40^{o}$. Звезды имеют одинаковую площадь миделя, которую при равной длине имеет круговой конус с углом полураствора 15.6^{o}. Расчет распределения давления и волнового сопротивления осуществляется на основе уравнений Эйлера методом [2]. При сверхзвуковых скоростях течение около звезд коническое. Расчет делается в плоскости перпендикулярной оси. На рис. 1 приведены примеры расчета.

Около сверхзвуковых кромок звезды реализуется присоединенная волна с существенной областью конического течения не только относительно вершины звезды, но и относительно кромок. Это используется в методе [2] для уменьшения расчетной области, которая размещается только в области существенного изменения параметров течения. На рис. 1а кроме сечения звезды можно видеть зоны повышенного давления: серым – в области за ударной волной, присоединенной к кромкам звезды; черным с более высоким давлением – в области около внутреннего ребра из-за интерференции между лепестками. Рассматривается течение при нулевом угле атаки и течение во всех циклах звезды подобное. В проведенных расчетах для обеих рассматриваемых геометрий реализовывался режим маховского взаимодействия ударных волн. На рис. 1б приведено давление в цикле звезды в случае $n = 6$. Но при дальнейшем увеличении n могут реализовываться и другие схемы течения. На рис. 1в приведен случай $n = 10$. В этом случае в начале реализуется регулярное взаимодействие ударных волн, а затем маховское при вазаимодействии ударной волной с поверхностями лепестков.

По результатам расчета получается распределение давления на поверхности звезды; и, вычисляя соответствующий интеграл по поверхности, получаем волновое сопротивление

звезды. Оценка сопротивления трения и донного сопротивления выполняется в соответсвии с рекомендациями [3]. При расчете трения учитывается площадь боковой поверхности тела, берется эквивалентная пластина, для которой есть фактически теоретическая оценка коэффициента трения. Донное сопротивление определяется на основе осредненных экспериментальных измерений донного давления в зависимости от числа Маха.

Результаты расчета коэффициента аэродинамического сопротивления *Cx* в зависимости от числа Маха *M* и сопоставление с экспериментальными данными приведены на рис. 2а. Расчеты приведены линиями с маркерами, а эксперимент – маркерами. Экспериментальные данные приведены для звезд и для эквивалентного конуса. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментом. Аэродинамическое сопротивление звезд меньше чем конуса, и с увеличением количества лепестков коэффициент сопротивления уменьшается. На рис. 2б приведен расчет относительного вклада волнового, трения и донного сопротивления для варианта $n = 6$. Согласно [3] донное сопротивление не зависит от n, трение пропорционально количеству лопастей. С увеличением количества лопастей вклад донного сопротивления и трения будет увеличиваться.

Апробирован способ расчета аэродинамического сопротивления звездообразных тел при сверхзвуковых скоростях. Проведенные расчеты показали, что оценку полного сопротивления звездообразного тела можно сделать в рамках уравнений Эйлера с определением волнового сопротивления и выполняя простым инженерным способом оценку коэффициента трения и донного сопротивления.

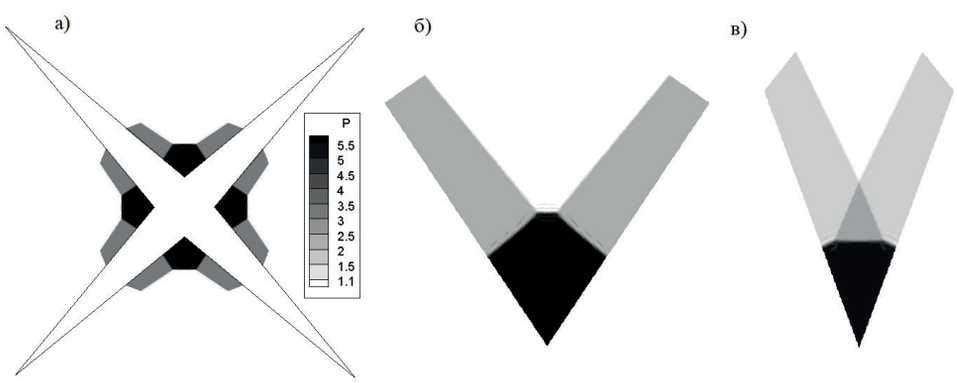


Рис. 1 Распределение давления при $M = 4$: а) $n = 4$, б) $n = 6$, в) $n = 10$

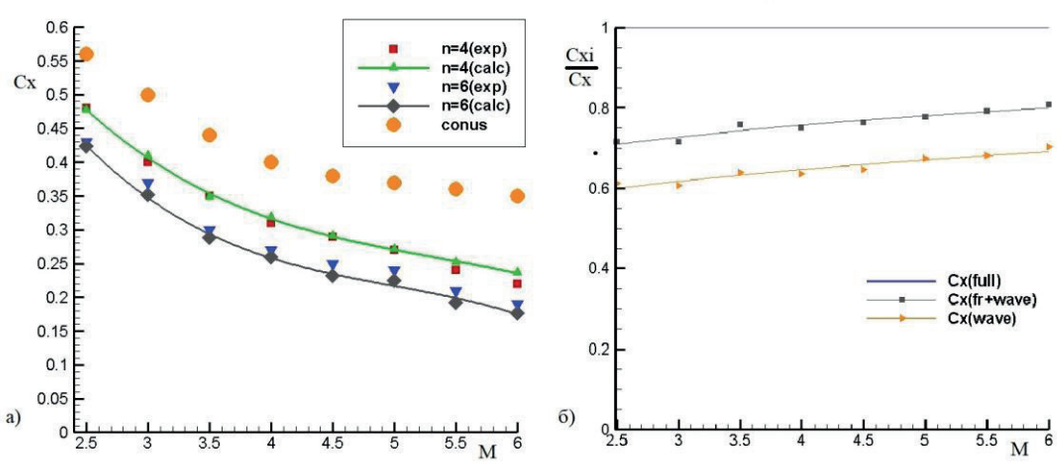


Рис. 2 Коэффициент аэродинамического сопротивления: а) полное сопротивление; б) относительный вклад составляющих при $n = 6$

Литература

1. *Швец А.И.* Аэродинамика сверхзвуковых форм. М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1987.
2. *Зубин М.А., Максимов Ф.А., Остапенко Н.А.* О некоторых особенностях структуры течения в ударных слоях конических течений газа // Изв. РАН. МЖГ. 2014. № 6. С. 118–134.
3. *Лебедев А.А., Чернобровкин Л.С.* Динамика полета беспилотных летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1973.

УДК 51-76

Моделирование влияний гендерных различий на заболеваемость туберкулёзом

В.Я. Киселевская-Бабинина[1], Т.Е. Санникова[2]

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2]Институт вычислительной математики РАН

По данным Федерального Центра мониторинга противодействия распространению туберкулеза за 2016 год по России выявлено около 78 тысяч новых случаев заболевания туберкулёзом; и заболеваемость составила 53,3 случая на сто тысяч человек. Из них мужчины составили 67,8%, женщины 32,2%. Разница в заболеваемости туберкулёзом мужчин и женщин может обуславливаться различной физиологией, поведением и социальной ролью [1–3]. В этой работе исследуются механизмы, объясняющие гендерные различия в заболеваемости туберкулёзом. Для этого на основе модели эпидемиологии туберкулёза в однородной популяции [4] предложена модель, описывающая популяцию, состоящую из мужчин и женщин.

Модель распространения туберкулёза в однородной популяции описывала динамику следующих субпопуляций: S – чувствительные индивиды старше 14 лет, L – индивиды с латентной инфекцией, неопасные для других и не имеющие симптомов, D – больные индивиды, у которых проявляются симптомы болезни, но которые не могут заражать других и B – бактериовыделители микобактерий туберкулёза, которые заражают чувствительных индивидов и имеют выраженные симптомы болезни. Поскольку скорость выздоровления больных значительно повышается при лечении, то были выделены еще две группы: D_0 и B_0 – выявленные больные, проходящие курс лечения в медицинских учреждениях. Чувствительные индивиды пополняются из группы подросткового возраста со скоростью ρ, умирают со скоростью μ и инфицируются со скоростью $\beta(B + kB_0)$ (здесь k описывает снижение заразности больных, проходящих лечение), переходя в стадию латентных больных с вероятностью $1 - p$ или сразу больных без бактериовыделения с вероятностью p. Латентная инфекция не вызывает увеличение смертности, но может активироваться со скоростью γ и при суперинфекции со скоростью $\alpha(B + kB_0)$. Больные без бактериовыделения умирают, вылечиваются, переходят в стадию бактериовыделения или становятся на учет в медицинских учреждениях со скоростями μ_D, β_L, β_B, φ_D соответственно. Больные с бактериовыделением умирают, вылечиваются или становятся на учет в медицинских учреждениях со скоростями μ_B, β_D и φ_B соответственно. Система уравнений имеет вид (1).

Построим новую модель отдельно описывающую распространение инфекции у мужчин и женщин. Для этого каждую группу индивидов разделим на две: мужчин и женщин с индексами m и f соответственно. Тогда описанные уравнения будут выполняться и для мужчин и для женщин в отдельности, как для двух автономных моделей. Отличие будет лишь в возможности мужчин и женщин заражать друг друга, коэффициент $B + kB_0$ в каждой подмодели заменится на $(B_m + B_f + k(B_{m0} + B_{f0}))$.

$$
\begin{aligned}
\frac{dS}{dt} &= \rho N - \beta S(B + kB_0) - \mu S,\\
\frac{dL}{dt} &= (1-p)\beta S(B + kB_0) + \beta_L D + \beta_{L0} D_0 - L(\gamma + \alpha(B + kB_0)) - \mu L,\\
\frac{dD}{dt} &= p\beta S(B + kB_0) + L(\gamma + \alpha(B + kB_0)) + \beta_D B - \beta_B D - \beta_L D - \varphi_D D - \mu_D D,\\
\frac{dB}{dt} &= \beta_B D - \beta_D B - \varphi_B B - \mu_B B,\\
\frac{dD_0}{dt} &= \varphi_D D + \beta_{D0} B_0 - \beta_{B0} D_0 - \beta_{L0} D_0 - \mu_{D0} D_0,\\
\frac{dB_0}{dt} &= \varphi_B B + \beta_{B0} D_0 - \beta_{D0} B_0 - \mu_{B0} B_0.
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

Для выявления различия в заболеваемости, производилась настройка новой модели при предположении постоянства численности всех групп. За основу были взяты общая численность населения и количество выявленных новых случаев по Москве за 2010 год. Поскольку некоторые факторы заболеваемости туберкулёзом не зависят от пола, мы предположили, что эпидемический процесс в группах мужчин и женщин может отличается по следующим скоростям: скорости инфицирования β, скорости спонтанного выздоровления β_L, скорости выздоровления при лечении β_{L0}, скоростям выявления больных с бактериовыделением φ_B и без φ_D, скорости ремиссии при лечении β_{D0}, скорости развития бактериовыделения при лечении β_{B0}, смертности больных μ_D, μ_{D0} и μ_{B0}.

Идентификация параметров модели по реальным данным по заболеваемости туберкулезом в Москве позволила получить следующие результаты.

Скорость инфицирования у мужчин в два раза выше, чем у женщин. Настоящее подтверждает предположения о том, что мужчины физиологически более уязвимы и склонны вести более рискованный образ жизни. Скорость выявления больных туберкулёзом без бактериовыделения у женщин в полтора раза выше. Скорость ремиссии при лечении и скорость спонтанного выздоровления у женщин в два раза выше. Такие высокие значения у женщин могут быть объяснены поведенческими факторами. Женщины раньше обращаются за медицинской помощью при появлении симптомов и более склонны соблюдать предписанный режим лечения. Отсюда следует, что изменение поведения может обеспечить значительное снижение заболеваемости туберкулезом.

Литература

1. *Neyrolles O., Quintana-Murci L.* Sexual inequality in tuberculosis // PLoS medicine. 2009. V. 6, N 12. P. e1000199.
2. *Hudelson P.* Gender differentials in tuberculosis: the role of socio-economic and cultural factors // Tubercle and Lung Disease. 1996. V. 77, N 5. P. 391–400.
3. *Holmes C. B., Hausler H., Nunn P.* A review of sex differences in the epidemiology of tuberculosis // Int J Tuberc Lung Dis. 1998. N 2. P. 96–10.
4. *Perelman M. I.* [*et al.*]. Tuberculosis epidemiology in Russia: the mathematical model and data analysis // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling, 2004. V. 19, N 4. P. 305–314.

УДК 577.352.27

Компьютерное исследование взаимодействия наночастиц с различными липидными мембранами

А.С. Гончарова, Ф.С. Орехов

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Развитие наноматериалов, таких как наночастицы и нанотрубки, ставит вопрос о целесообразности их прикладного применения, например, в задачах фармакологии и медицины [1–2]. Для этих целей строится математическая модель биомембраны и исследуется процесс проникновения внутрь неё одной или нескольких наночастиц [3].

Ранее было выявлено, что в зависимости от количества холестерина в липидном бислое последний имеет различные свойства, т.е. состоит как в упорядоченной, так и в жидко-неупорядоченной фазе, что существенным образом влияет на характер проникновения наночастиц внутрь такого бислоя [4].

Под жидко-упорядоченной фазой L_o (от англ. «liquid ordered phase») понимается структура биомембраны, в которой липидные «хвосты» в большей мере упорядочены, при этом латеральная подвижность высока. В жидко-неупорядоченной фазе L_d (от англ. «liquid disordered»), наоборот, липидные «хвосты» расположены наиболее хаотичным образом [5].

В данной работе изучается строение липидных бислоев, факторы, влияющие на конфигурацию и эффекты, вызванные определенным строением биомембраны при взаимодействии с ней одиночных стандартных углеродных нанотрубок средней длины.

Моделирование производилось в ячейках с поляризуемой водой и ионным окружением в крупнозернистом поле потенциалов MARTINI. Рассматривались два набора систем.

1. Липидные бислои DPPE с различным ионным окружением: ионы кальциевой или натриевой солей соляной кислоты.
2. Липидные бислои POPE в окружении ионов Na^+ и Cl^- с различным содержанием холестерина: 0%, 30% и 50% по количеству молекул.

Для первого набора систем различие в фазах было вызвано различным ионным окружением и было выявлено при сравнении толщины бислоя и площади, приходящейся на липид.

Для второго набора, напротив, при одинаковой толщине было обнаружено различие фаз по изменению коэффициента диффузии и параметру порядка.

Для биомембран в различных фазах было смоделировано их взаимодействие с углеродными нанотрубками и выявлены отличия в ориентации нанотрубки внутри липидного бислоя в зависимости от его фазы.

Литература

1. *Baoukina S., Monticelli L., and Tieleman D.P*. Interaction of pristine and functionalized carbon nanotubes with lipid membranes // J. Phys. Chem. B. 2013. V. 117, N 40. P. 12113– 12123.
2. *Gangupomu V.K. and Capaldi F.M.* Interactions of carbon nanotube with lipid bilayer membranes // J. Nanomat., 2011. V. 2011.
3. *Hsu P.C., Jefferies D. and Khalid S*. Molecular Dynamics Simulations Predict the Pathways via Which Pristine Fullerenes Penetrate Bacterial Membranes // J. Phys. Chem. B, 2016. V. 120, N. 43. P. 11170–111179.
4. *Sastre J. and Mannelli I. and Reigada R.* Effects of fullerene on lipid bilayers displaying different liquid ordering: a coarse-grained molecular dynamics study // BBA. General Subjects, 2017.
5. *Рубин А.Б.* Биофизика. Т. 2. Биофизика клеточных процессов. Биофизика мембранных процессов. М.: Издательство МГУ, 2004. 944 с.

УДК 534.222.2

ЗНД-структура детонационной волны в рамках двухстадийной модели кинетики химических реакций

Я.Э. Порошина[2], П.С. Уткин[1,2]

[1]Институт автоматизации проектирования РАН
[2]Московский физико-технический институт (государственный университет)

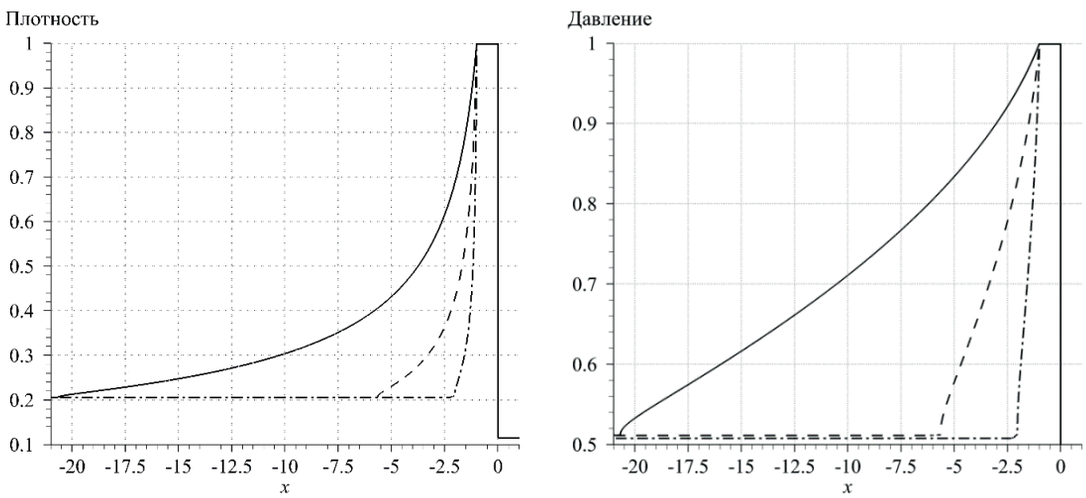
Несмотря на долгую историю аналитических и численных исследований нелинейной динамики распространения детонационных волн (ДВ), в этой области до сих пор остается ряд нерешенных вопросов. Так, линейный анализ устойчивости решения Зельдовича–Неймана–Деринга (ЗНД), описывающего стационарную ДВ, выполнен только для простейшего случая одностадийной модели кинетики химических реакций. Другой пример связан с расчетом поперечного размера детонационной ячейки, который, как правило, получается меньше, чем в натурных экспериментах. Данная работа является первым шагом для развития исследования [1]. Задача заключается в построении решения ЗНД для случая двухстадийной модели кинетики химических реакций, учитывающей стадию индукции и стадию тепловыделения. Данное решение будет использоваться в качестве начального условия при решении задачи о расчете распространения ДВ в системе координат, связанной с лидирующим скачком. По-видимому, впервые двухстадийные модели кинетики были предложены в работах В.П. Коробейникова, В.А. Левина, В.В. Маркова в конце 1970-х гг. и с тех пор продолжают активно использоваться в исследованиях детонации.

Структура стационарной ДВ в рамках модели ЗНД описывается следующей системой обыкновенных дифференциальных уравнений [2, 3], записанной в системе координат, связанной с фронтом волны:

$$\begin{cases} \dfrac{d\rho}{dx} = -\dfrac{\rho}{u}\dfrac{du}{dx}, \\ \dfrac{du}{dx} = -\dfrac{Qu(\gamma-1)}{c^2(1-u^2/c^2)}\dfrac{d\lambda_r}{dx}, \\ \dfrac{dp}{dx} = -\rho u\dfrac{du}{dx}, \\ \dfrac{d\lambda_i}{dx} = -\dfrac{1}{u}K_i H(1-\lambda_i)\exp(-E_a\rho/p), \\ \dfrac{d\lambda_r}{dx} = \dfrac{1}{u}[1-H(1-\lambda_r)]K_r(1-\lambda_r)^{\nu}. \end{cases}$$

Здесь x – пространственная координата, ρ – плотность, p – давление, c – скорость звука, $u = D - v$ – скорость газа в системе координат, связанной с фронтом волны, D – скорость ДВ, v – скорость газа в лабораторной системе координат, λ_i – переменная прогресса зоны индукции со значением 1 в реагентах и 0 в конце индукционной зоны, λ_r – переменная прогресса зоны тепловыделения, которая равняется 0 в зоне индукции и растет до 1 за ней, H – функция Хевисайда, K_i и K_r – константы скоростей реакций на стадии индукции и тепловыделения, E_a – энергия активации, Q – тепловой эффект, ν – порядок реакции на стадии тепловыделения, γ – показатель адиабаты. Считается, что газ подчиняется уравнению состояния идеального газа. Определяющая система уравнений приводится к безразмерному виду с использованием параметров фон Неймана и характерного пространственного и временного масштабов, определяемых зоной индукции. В качестве начальных условий используются параметры фон Неймана. Для решения сформулированной задачи Коши используется неявный метод Эйлера [4].

Рисунок 1 иллюстрирует профили плотности и давления в решении ЗНД при варьировании константы K_r на стадии тепловыделения при следующих физико-химических параметрах задачи: $Q = 10.3875$, $E_a = 5.0$, $\gamma = 1.2$, $\nu = 0.5$ [5]. В выбранной системе характерных масштабов длина зоны индукции во всех расчетах остается равной 1.



(а) (б)

Рис. 1. Рассчитанные ЗНД-профили (а) плотности и (б) давления. Сплошная линия – $K_r = 0.1$, пунктирная линия – $K_r = 0.4$, пунктирная с точкой – $K_r = 1.6$

Литература

1. *Лопато А.И., Уткин П.С.* Детальное математическое моделирование пульсирующей детонационной волны в системе координат, связанный с лидирующим скачком // ЖВМ и МФ. 2016. Т. 56. № 5. С. 856.
2. *Lee J.H.S.* The Detonation Phenomenon. – Cambridge University Press, 2008.
3. *Leung C., Radulescu M.I., Sharpe G.J.* Characteristics analysis of the one-dimensional pulsating dynamics of chain-branching detonations // Physics of Fluids. 2010. V. 22. Paper 126101.
4. *Уткин П.С., Лопато А.И.* Математическое моделирование детонационных волн: уч.-метод. пособие. М.: МФТИ, 2017. 24 с.
5. *Borzou B., Maxwell B., Radulescu M.I.* Influence of the reaction-to-induction length ratio on the stability of cellular detonation // Proc. 23rd ICDERS. July 24–29, 2011. Irvine, USA.

УДК 519.63

Математическое моделирование инициирования детонации при отражении ударной волны от профилированного торца канала

А.И. Лопато, П.С. Уткин

Институт автоматизации проектирования РАН
Московский физико-технический институт (государственный университет)

Детонационная волна (ДВ) представляет собой самоподдерживающийся ударный разрыв, за фронтом которого непрерывно инициируется химическая реакция вследствие нагрева при адиабатическом сжатии. Важным вопросом в исследовании ДВ является проблема инициирования и распространения ДВ в областях сложной формы. Такие задачи часто возникают при исследовании проблем взрывобезопасности, разработки перспективных силовых установок и энергетических систем. В данной работе рассматривается инициирование ДВ за счет отражения относительно слабой ударной волны (УВ) в так называемых многофокусирующих криволинейных отражателях [1].

Варьирование конструкции отражателя позволяет минимизировать интенсивность падающей волны и, следовательно, энергию, необходимую для инициирования. Стоит отметить, что к проблеме инициирования детонации при отражении УВ от профилированного торца канала обращались многие исследователи – А.А. Васильев, Б.Е. Гельфанд, О.Г. Пенязьков, Н.Н. Смирнов с соавторами и многие другие.

Как правило, для проведения расчетов в областях сложной формы используются блочно-структурированные расчетные сетки и численные схемы низкого порядка аппроксимации. Целью работы является математическое моделирование инициирования и распространения ДВ в эллиптических отражателях на неструктурированных треугольных расчетных сетках при использовании вычислительного алгоритма повышенного порядка аппроксимации, а также сравнительный анализ результатов при использовании отражателей различных геометрий.

Математическая модель основана на двумерной системе уравнений Эйлера, дополненной моделью кинетики химической реакции Аррениуса. Определяющая система уравнений приводится к безразмерному виду с использованием параметров невозмущенной смеси. В качестве масштаба длины выступает «длина полупревращения», которая равна расстоянию за фронтом ДВ, на котором доля реагента уменьшается от 1 до 0.5 в решении Зельдовича–Неймана–Деринга, описывающего стационарную детонационную волну. Рассматриваются физико-химические константы, соответствующие устойчивой детонации, более подробно см. в [2].

Основной особенностью численной методики является использование полностью неструктурированных расчетных сеток с треугольными ячейками, для построения которых используется триангуляция Делоне расчетной области. Триангуляция Делоне основана на расстановке узлов расчетной сетки таким образом, чтобы выполнялось условие Делоне, которое заключается в том, что внутрь окружности, описанной вокруг любого построенного треугольника, не должен попадать ни один из узлов.

Вычислительный алгоритм основан на принципе расщепления по физическим процессам. На газодинамическом этапе система уравнений Эйлера численно решается с использованием метода конечных объемов, схемы Рунге–Кутты второго порядка аппроксимации интегрирования по времени, численном потоке AUSM [3]. Для достижения второго порядка аппроксимации по пространственным переменным используется восполнение [4] с ограничителем minmod. На этапе химической кинетики происходит решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений для температуры и доли реагента неявным методом Эйлера. Подробное описание вычислительного алгоритма и его применения для решения канонической задачи о формировании ячеистой структуры детонации приведено в [5].

Рассмотрим отражатель, состоящий из участка эллипса. Геометрия и размеры эллипса качественно соответствуют параметрам отражателя из [1]. Длина канала составляет 57.1 единиц, ширина – 20. Для уменьшения времени расчета будем рассматривать половину канала с условием симметрии на верхней границе. На правой и нижней границах устанавливаются граничные условия непротекания. На левой границе задается условие втекания.

Результаты расчетов показали, что УВ с числом Маха 2.5 оказывается достаточно для инициирования ДВ в канале рассматриваемой длины, ширины при наличии отражателя. На рис. 1 продемонстрировано поле температуры газа после успешного инициирования ДВ. Для инициирования ДВ в прямоугольном канале необходимо увеличение числа Маха или длины канала, что оправдывает использование отражателей с точки зрения оптимизации экспериментальной установки для инициирования ДВ.

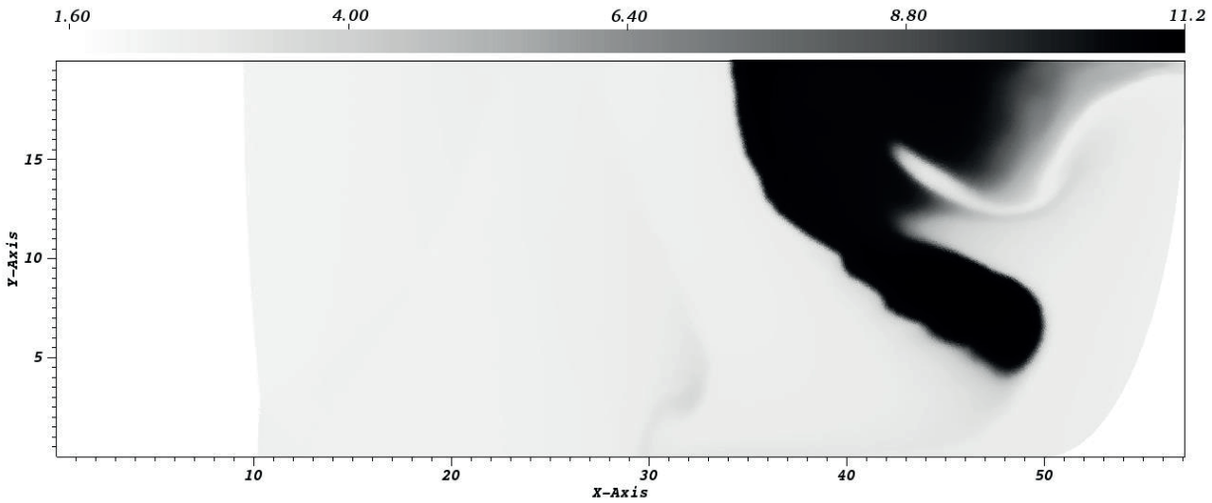


Рис. 1. Рассчитанное пространственное распределение температуры после инициирования детонации при отражении УВ с числом Маха 2.5 в эллиптическом отражателе

Исследование А.И. Лопато выполнено при поддержке РФФИ (грант № 16-31-00408). Исследование П.С. Уткина выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Москвы (грант № 15-31-70004).

Литература

1. *Васильев А.А.* Ячеистые структуры многофронтовой детонационной волны и инициирование (обзор) // ФГВ. 2015. Т. 51. № 1. С. 9.
2. *Лопато А.И., Уткин П.С.* Детальное математическое моделирование пульсирующей детонационной волны в системе координат, связанной с лидирующим скачком // ЖВМ и МФ. 2016. Т. 56. № 5. С. 856.
3. *Liou M.-S., Steffen Jr C.J.* A new flux splitting scheme // JCP. 1993. V. 107. P. 23.
4. *Chen G., Tang H., Zhang P.* Second-order accurate Godunov scheme for multicomponent flows on moving triangular meshes // J. Sci. Comp. 2008. V. 34. P. 64.
5. *Лопато А.И., Уткин П.С.* Особенности математического моделирования течений с волнами детонации на неструктурированных расчетных сетках // Вычислительные методы и программирование. 2017. Т. 18. № 4. С. 348.

УДК 519.17

Робастность транспортных сетей Москвы и Санкт-Петербурга

А.В. Розин

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Разработанные в теории сложных сетей методы исследования робастности [1] позволяют изучать устойчивость дорожных сетей городов к авариям и выходам из строя без необходимости сбора больших объёмов статистических данных и без использования крупных вычислительных мощностей, т.к. базируются на анализе самой топологии сети. Кроме того, эти методы позволяют моделировать различные ситуации на дорогах города и прогнозировать последствия тех или иных происшествий.

В данной работе были изучены дорожные сети Москвы и Санкт-Петербурга. Эти сети исторически формировались по-разному и обладают принципиально разной структурой. Москва имеет радиально-кольцевую планировку, центр города появился в XII–XIII вв. и развивался стихийно. Санкт-Петербург же имеет решётчатую структуру, которая развивалась централизованно и планомерно, а не стихийно. Кроме того, Санкт-Петербург

расположен на нескольких островах, соединённых мостами, что вносит определённые коррективы в достижимость вершин сети при удалении нагруженных ребёр.

В работе были использованы две модели построения сети: в первой вершинами являлись пересечения дорог, а рёбрами – соединяющие их участки дорог (модель перекрёстков), во второй вершинами являлись отрезки дорог, и две вершины соединялись рёбрами, если соответствующие им участки дорог пересекались (модель отрезков [2]). Робастность исследовалась с использованием нескольких разных стратегий удаления вершин: они удалялись в случайном порядке, в порядке убывания показателей betweenness centrality, а также с использованием каскадных процессов. Каскадным процессом называется последовательный выход из строя узлов графа, возникающий в результате удаления небольшой доли узлов из сети. В результате такого процесса вся сеть или крупная её часть может быть парализована.

При изучении каскадных процессов также использовались две модели: модель глобальных перегрузок [3], а также разработанная автором модель локальных перегрузок. В первой каскадный процесс на каждом шаге охватывал всю сеть целиком: после удаления некоторой доли вершин исследовалось, превысила ли нагрузка на остальные узлы сети порог допуска. Если для некоторого подмножества узлов порог был превышен, то эти узлы на следующем шаге удалялись и процесс повторялся. В модели же локальных перегрузок изучалась нагрузка не на все узлы сети, а только на те, которые находились в одном районе (community) с удалёнными. После этого процесс на каждом шаге повторялся для районов, смежных с исследованными на предыдущем шаге. Таким образом моделировалось постепенное распространение заторов, свойственное дорожным сетям.

По результатам исследования с использованием разных моделей было обнаружено, что несмотря на малое количество мостов между островами, дорожная сеть Санкт-Петербурга более устойчива к авариям, чем дорожная сеть Москвы. Кроме того, было проведено аналогичное исследование для «идеальных структур» – графов, моделирующих сетчатую и радиально-кольцевую планировки и имеющих равное число вершин и рёбер. Расчёт также показал преимущество сетчатой структуры над радиально-кольцевой. Таким образом, было показано, что меньшая устойчивость дорожной сети Москвы является следствием её планировки. Построенная в работе модель может быть использована для моделирования последствий аварий, планирования ремонтных работ на дорогах и минимизации их последствий для трафика в дорожных сетях.

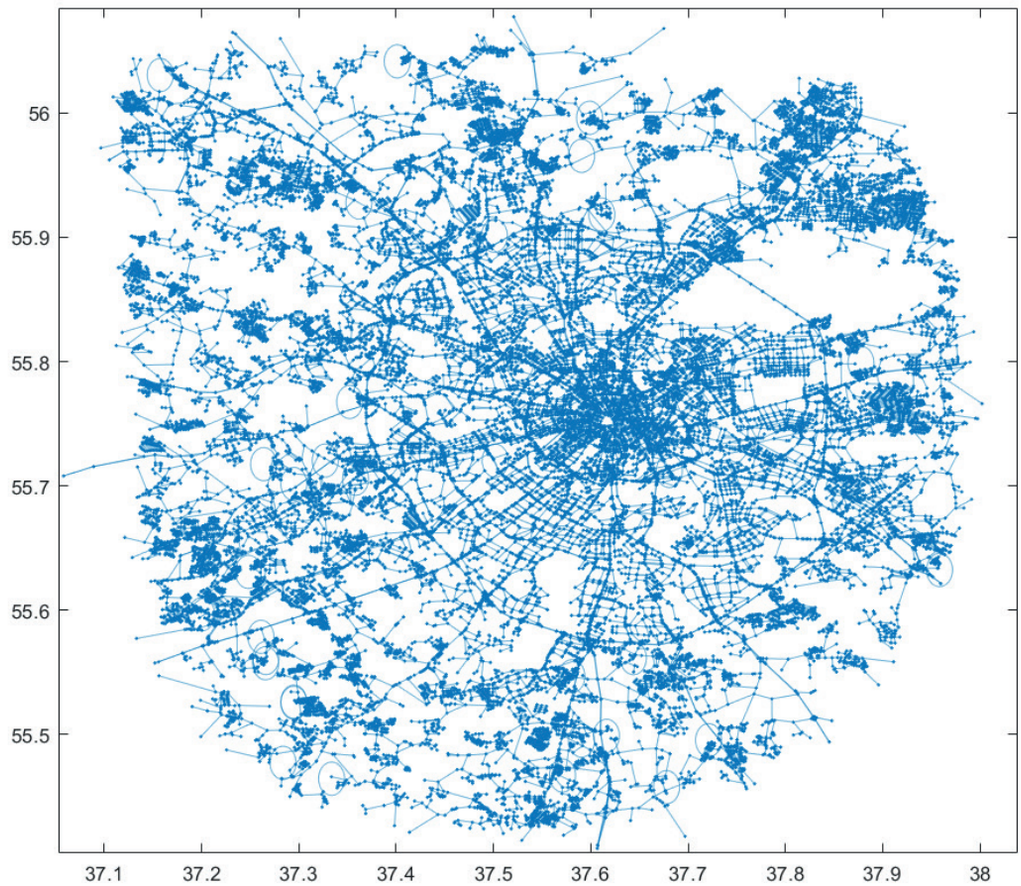


Рис. 1. Граф дорожной сети города Москвы

Литература

1. *Albert R., Jeong H., Barabási A.-L.* Error and attack tolerance of complex networks // Nature. 2000. 406. P. 378.
2. *Duan Y., Lu F.* Robustness of city road networks at different granularities // Physica A. 2014. 411. P. 21–34.
3. *Motter A.E., Lai Y.C.* Cascade-based attacks on complex networks // Phys. Rev. E. 2002. E 66 065102.

УДК 539.374

К исследованию толщины упрочненного слоя вблизи поверхности с высокими удельными силами трения

Д.М. Идрисов

Московский физико-технический институт (государственный университет)

В процессах обработки материалов давлением в окрестности поверхностей максимального трения образуется тонкий упрочненный слой. Для теоретического предсказания толщины такого слоя возможно применение подхода [1], основанного на коэффициенте интенсивности скорости деформации (КИСД), который характеризует интенсивность эквивалентной скорости деформации вблизи поверхности максимального трения.

Цель данного исследования – разработать численный метод для расчета КИСД с использованием метода характеристик на примере задачи Прандтля: процесса осадки тонкого слоя пластического материала между двумя жесткими плитами (рис. 1), на

поверхности которых действует максимальные усилия трения (закон максимального трения). Рассматривается пластическое течение в условиях плоской деформации для материала, подчиняющегося условию текучести Мизеса.

Для построения поля характеристик и скоростей использовались уравнения для радиусов кривизны вдоль характеристик и уравнения Гейрингер [2]:

$$dS + Rd\varphi = 0 \ , \ \ dR - Sd\varphi = 0 \, , \tag{1}$$

$$d\upsilon_\alpha - \upsilon_\beta d\varphi = 0, \quad d\upsilon_\beta + \upsilon_\alpha d\varphi = 0 \, , \tag{2}$$

где R, S – радиусы кривизны характеристик α и β соответственно, $\upsilon_\alpha, \upsilon_\beta$ – проекции скорости на направления характеристик, φ – угол наклона касательной к линии α. В [3] получено, что эквивалентная скорость деформации стремится к бесконечности вблизи поверхности максимального трения:

$$z \to 0 \quad \xi_{eq} = \frac{D}{\sqrt{z}} + O(\sqrt{z}) \ , \tag{3}$$

$$\xi_{eq} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[-\frac{\partial \upsilon_\alpha}{S \partial \beta} + \frac{\upsilon_\beta}{S} + \frac{\upsilon_\alpha}{R} + \frac{\partial \upsilon_\beta}{R \partial \alpha} \right], \tag{4}$$

где z – расстояние до поверхности максимального трения, ξ_{eq} – эквивалентная скорость деформаций. Выражение (3) справедливо лишь в окрестности огибающей характеристик, где $S = R = 0$, для этих случаев в [4] получены уравнение для расчета КИСД и аналитическое значение для безразмерного КИСД, при $S = 0$ эти уравнения имеют вид

$$z \to 0 \quad \xi_{eq} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{E_S}{|S|}, \quad E_S = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[-\frac{\partial \upsilon_\alpha}{\partial \beta} + \upsilon_\beta \right], \quad S = S_0 \sqrt{z} + O(\sqrt{z}) \, , \tag{5}$$

$$\frac{\partial S}{\partial \beta} = -\frac{S_0^2}{2m} + O(\sqrt{z}) \, , \tag{6}$$

$$D = \frac{E_S}{|S_0|}, \quad d = D \frac{\sqrt{H}}{V}, \quad d_{an} = \sqrt{\frac{2}{3}} \, , \tag{7}$$

где $m = \pm 1$, D – КИСД, d – безразмерный КИСД, d_{an} – аналитическое значение для безразмерного КИСД.

На основе численных результатов построен график распределение безразмерного КИСД вблизи поверхности максимального трения (рис. 2) для различных геометрических параметров процесса. Из рис. 2 следует, что наилучшие совпадение с аналитической оценкой [4], наблюдается вдали от жестких зон. Используя распределение коэффициента интенсивности скорости деформации на поверхности и вид функции, которая определяет зависимость толщины слоя от коэффициента (должна быть получена из экспериментальных данных), может быть определена толщина упрочненного слоя.

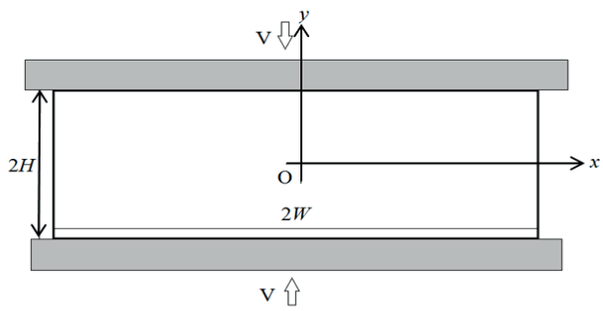


Рис. 1. Геометрическая схема процесса осадки, где V скорость осадки

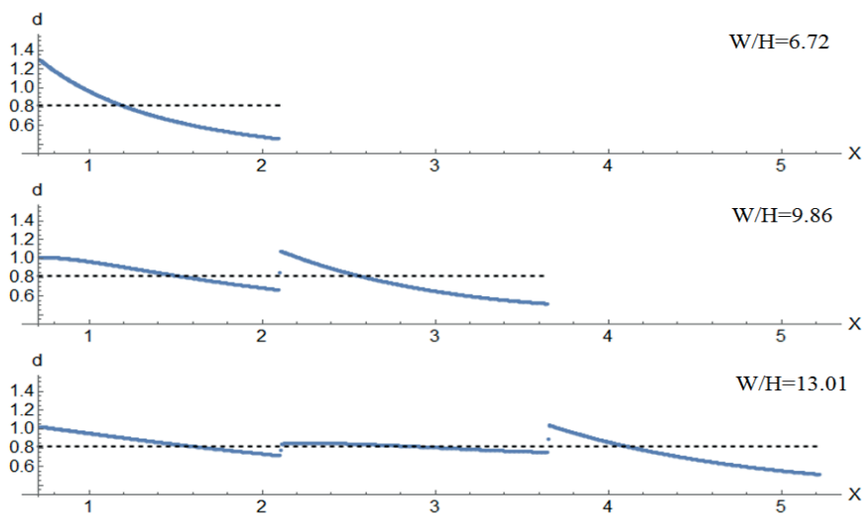


Рис. 2. Распределение безразмерного КИСД для разной геометрии

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ-16-49-02026.

Литература

1. *Гольдштейн Р.В., Александров С.Е.* Подход к предсказанию формирования микроструктуры материала вблизи поверхностей трения при развитых пластических деформациях // Физическая механика. 2014. Т. 17, № 5.
2. *Хилл Р.* Математическая теория пластичности. М.: Гостехиздат, 1956. 408 с.
3. *Alexandrov S., Richmond O.* Singular plastic flow fields near surfaces of maximum friction stress // Int. J. Non-Linear Mech. 2001. V.36, N.1. P.1–11.
4. *Alexandrov S., Kuo C.-Y., Jeng Y.-R.* A numerical method for determining the strain rate intensity factor under plane strain conditions // Continuum Mech. Thermodyn. 2016. 28:977–992.

УДК 519.63

Математическое моделирование обтекания парашютной системы

Ф.А. Максимов, Ю.Д. Шевелев

Институт автоматизации проектирования РАН

При спуске в разреженной атмосфере Марса парашютная система должна функционировать при сверхзвуковых скоростях полета. Материал поверхности парашюта представляет собой проницаемую поверхность. Традиционные подходы для моделирования обтекания такой поверхности заключаются в постановке специальных граничных условий, связывающих скорость протекания через поверхность и разность давлений по обе стороны поверхности. Необходимые коэффициенты зависят от

характеристик используемого материала и обычно определяются с помощью эспериментальных исследований.

В работе используется альтернативный подход, когда проницаемая поверхность моделируется набором тел, расположенных в определенном порядке. Для расчета обтекания такой системы применяется метод численного моделирования сверхзвуковых течений на множестве перекрывающихся сеток [1]. На рис. 1а приведен пример расчетной сетки.

На равномерную с прямоугольными ячейками сетку, предназначенную для расчета внешнего невязкого течения, накладывается множество сеток, которые связаны с поверхностью обтекаемых тел. Данные криволинейные сетки имеют сгущение узлов к поверхности тела, позволяют описать течение в пограничном слое около тела и на них решаются уравнения Навье–Стокса в приближении тонкого слоя. Если тела расставить в определенном порядке, то они могут образовать некоторую поверхность, например, моделирующую купол парашюта. На рис. 1б приведен пример расчета осесимметричного течения около проницаемой поверхности, составленной из набора тел эллиптического сечения. Перед проницаемой поверхностью, так же как и перед изолированным телом, в сверхзвуковом потоке образуется общая ударная волна.

Одна из проблем построения парашюта для сверхзвуковых скоростей полета демонстрируется на рис. 2.

В потоке перед куполом парашюта находится тело, которое тормозится парашютом. Для лучшего функционирования парашюта он должен иметь максимально возможный коэффициент сопротивления. За телом образуется след, который взаимодействует с головной волной купола. При достаточно сильных взаимодействиях следа и ударной волны образуется вихревая структура, которая приводит к потере эффективности парашюта, так как часть поверхности оказывается в области вихревой структуры и ее эффективность уменьшается. Расчет, представленный на рис. 2, отличается от представленного на рис. 1б только тем, что перед куполом находится дополнительное тело, которое формирует след, взаимодействующий с ударной волной. Течения в обоих случаях представлены *изолиниями давления* и *линиями тока*.

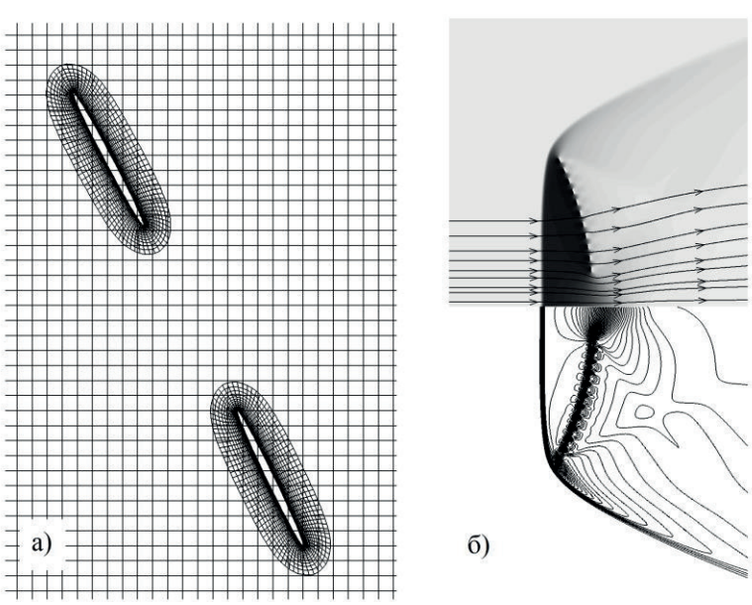


Рис. 1. Фрагмент расчетной сетки и пример расчета течения около осесимметричного купола (M = 3)

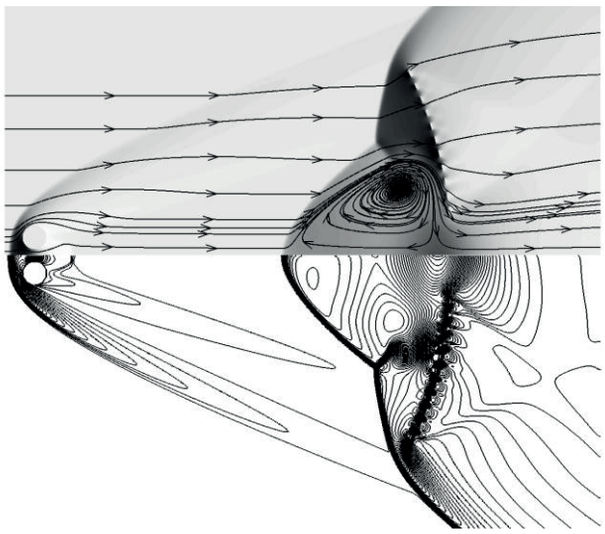


Рис. 2. Пример расчета обтекания парашюта с образованием вихревой структуры около купола (M = 3)

Литература

1. *Максимов Ф.А.* Сверхзвуковое обтекание системы тел // Компьютерные исследования и моделирование. 2013. Т. 5, № 6. С. 969–980.

УДК 577.322.4

Оптимизация пакета PIPER под задачи белок-пептидного докинга

А.И. Канзафарова

Московский физико-технический институт (государственный институт)

В наше время активно расширяется набор инструментов для решения задачи определения структуры белок-белкового комплекса на основе трехмерных структур белков его составляющих (белок-белковый докинг) [1–2]. Также большое развитие получают различные соревнования по предсказанию структур белок-белковых комплексов (CAPRI,D3R). Что приводит к значительному прогрессу в данной области знаний.

Однако наряду с задачей белок-белкового докинга существует смежная – определение пространственного взаимодействия белка и пептида, имеющая так же большое значение в структурной и функциональной организации клеток. Например, пептиды-шапероны являются обязательными в свертывании некоторых белков в третичную или четвертичную структуры, а также имеют высокие регенеративные функции.

Проблема изучения белок-пептидных взаимодействий состоит в том, что на данный момент отсутствуют пакеты, настроенные под их специфику (значительно меньший размер и высокая изменчивость трехмерной структуры), поэтому результаты прямого применения инструментов для белок-белкового докинга не точны или невозможны в природе. Задача данной работы состоит в адаптации имеющихся подходов для моделирования белок-пептидных взаимодействий.

В настоящей работе предпринята попытка исправить ошибки, связанные с малыми размерами пептидов по сравнению с белками. За основу был взят свободно распространяемый пакет PIPER [3]. PIPER рассматривает все возможные (в пределах настраиваемого количества) взаимные расположения белков друг относительно друга и выбирает наиболее выгодные с точки зрения энергии взаимодействия.

Ниже приведена энергетическая скоринговая функция, описывающая взаимодействие рецептора и лиганда как сумму p корреляционных функций для всех возможных трансляций α, β, γ лиганда относительно рецептора:

$$E(\alpha,\beta,\gamma) = \sum_p \sum_{i,j,k} R_p(i,j,k) L_p(i+\alpha, j+\beta, k+\gamma),$$

где $R_p(i,j,k)$ и $L_p(i,j,k)$ являются компонентами корреляционной функции, определенной на рецепторе и лиганда соответственно.

Функция энергии задана как сумма членов, представляющих вклад комплементарности поверхности, электростатический и десольватационный вклады [4]:

$$E = E_{shape} + \omega_2 E_{elec} + \omega_3 E_{pair},$$

$$E_{shape} = E_{attr} + \omega_1 E_{rep},$$

где коэффициенты ω_1, ω_2 и ω_3 являются весами различных вкладов в функцию энергии.

Значение ω_1 выбирается таким образом, чтобы избежать значительных steric clash, но допустить некоторые атомные перекрытия, которые происходят из-за различий в структурах белков.

В настоящей работе мы оптимизировали работу PIPER, подбирая коэффициенты ω_i для корректных результатов в исследовании белок–пептидных взаимодействий.

Литература

1. *Halperin I, Ma B, Wolfson H, Nussinov R.* Principles of docking: an overview of search algorithms and a guide to scoring functions. // Proteins. 2002.
2. *Smith G, Sternberg M*. Prediction of protein–protein interactions by docking methods // Curr Opin Struct Biol. 2002.
3. *Kozakov D., Brenke R., Comeau S.R., Vajda S.*PIPER: An FFT-Based Protein Docking Programwith Pairwise Potentials. Wiley, 2006.
4. *Gabb H, Jackson R, Sternberg M.* Modelling protein docking using shape complementarity, electrostatics, and biochemical information. // J Mol Biol, 1997.

УДК 577.322.4

Оптимизация пакета PIPER. Быстрое моделирование белковых скоплений с использованием энергетического ландшафта простых молекулярных белок-белковых взаимодействий

Д.С. Жемчужников

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Белок-белковые взаимодействия являются основным звеном структурной и функциональной организации клеток. Исследование данных взаимодействий дает лучшее понимание таких процессов, как метаболический контроль, трансдукция сигналов и регуляция генов. Несмотря на то, что результатом изучения протеомики в геноме является обозначение более широкого списка взаимодействующих белков, только небольшая часть потенциальных комплексов поддается непосредственному экспериментальному анализу. Из этого становится понятно, насколько важны методы белок-белкового докинга (стыковки), которые могут объяснить детали конкретных взаимодействий на атомном уровне. Необходимость точных методов особенно актуальна для медицины, например, аккуратный докинг помогает значительно снизить пространство поиска при разработке новых лекарственных препаратов.

Наиболее удачным представляется метод, используемый PIPER [1]. Внедрение потенциала DARS [2], использование метода кластеризации и технологии SDU, вычисление парного потенциала с исключением некоторых собственных значений матрицы взаимодействий, обеспечили превосходство программы над более ранними аналогами.

PIPER проводит оценку энергетической функции в дискретизированном 6D-пространстве взаимных ориентаций двух белков. Программа использует 70 000 оборотов, которые приблизительно соответствуют выборке в каждые 5 градусов в пространстве углов Эйлера. В трансляционном пространстве выборка определяется размером ячейки сетки 1,2 Å. Энергетическая функция, описывающая взаимодействия

рецептора и лиганда, определяется на этой сетке и эффективно рассчитывается с использованием быстрых преобразований Фурье. Результаты кластеризуются с размером куба 10 Å, и один или несколько наименьших энергетических сдвигов для данного вращения сохраняются. Наконец, собираются и сортируются результаты разных поворотов.

В данной работе предлагается уменьшить область рассматриваемых конформаций путем сопоставления размеров ячейки и размеров рецептора. В качестве некоторого упрощения рецептор и лиганд представляются как эллипсоидальные объекты [3]. Объем ячейки определяется концентрацией; ее размеры подбирается таким образом, чтобы от эллипсоида рецептора, помещенного в угол прямоугольной ячейки, до трех граней, с которыми эллипс не соприкасается, было одинаковое расстояние. Теперь при заданных размерах ячейки и рецептора и их взаимном расположении область, в которой должен находиться лиганд, определена. То есть для каждой конформации, если известны ее параметры, поворот и сдвиг, пользуясь данной оценкой, можно однозначно установить, является ли эта конформация близкой к естественной или нет.

Литература

1. *Kozakov D., Brenke R., Comeau S.R., Vajda S.* PIPER: An FFT-Based Protein Docking Program with Pairwise Potentials // Proteins: Structure, Function, and Bioinformatics. 2006. N 65. P. 392–406.
2. *Chuang G-Y., Kozakov D., Brenke R., Comeau S.R., Vajda S.* DARS (Decoys As the Reference State) Potentials for Protein-Protein Docking // Biophys. J. 2008. N 95. P. 4217–4227.
3. *Kastelic M., Kalyuznyi Y.V., Hribar-Lee B., Dill K.A., Vlachy V.* Protein Aggregation in Salt Solutions // PNAS. 2015. V. 112, N 21. P. 6766–6770.

Секция высоких технологий в обеспечении безопасности жизнедеятельности

УДК 004.355

Принцип работы и создание прототипа фонаря и лазерного целеуказателя со светом, невидимым для камер наружного наблюдения

А.А. Подкопаев, А.А. Хетагуров, В.Э. Буздин, И.Б. Линицкий

Московский физико-технический институт (государственный университет)
Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России

Целью данной работы являлось создание рабочего прототипа фонаря и ЛЦУ, свет которых невиден через камеры наружного наблюдения.

Всесторонние научные исследования в области технического оснащения вверенных сил необходимыми средствами, необходимыми для предупреждения, предотвращения и ликвидации последствий ЧС, проводились ранее и ведутся сегодня в Федеральном центре науки и высоких технологий «Всероссийский научно – исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций» МЧС России [1].

В данной работе были рассмотрены следующие варианты возможного применения данной разработки:

1) прожектор для десантников, необходимый при десантировании ночью на незнакомый ландшафт;
2) лазерный целеуказатель;
3) освещение полигона во время испытаний рабочих образцов,
4) общение с помощью азбуки Морзе;
5) работа противотуманного прожектора, совместно с ионизатором типа ГИОНК;
6) источник инфракрасного света для соответствующих камер;
7) работа в шахтах и на задымленных участках;
8) создание робота разведчика типа «Заяц».

Был описан принцип работы данного устройства, основанный на несовершенстве камер и матриц по сравнению с человеческим глазом.

Также было продемонстрированно два рабочих образца:

1) фонарь-прожектор типа «Данко»;
2) ЛЦУ типа «Бинди»;

В работе были сформулированы следующие проблемы, требующие решения:

1) существующие прототипы необходимо сделать меньше и легче;
2) пользовательский интерфейс нуждается в доработке;
3) увеличить срок работы батареи и продлить время автономной работы путем оптимизации алгоритма;
4) необходимость создания устройства автоматической подстройки под конкретный тип камеры.

Литература

1. Постановление Правительства Российской Федерации от 30 декабря 2003 г. № 794 «О единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций».

УДК 330.46

Методологический подход оценки профессионального поведения спасателей и граждан, приобретающих статус спасателя на право ведения газоспасательных работ

Л.Р. Борисова[1,2], Ю.В. Подрезов[1], А.Ю. Шевелев[2],

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2]Финансовый университет при Правительстве РФ

Для проведения интегральной оценки по всему множеству разработанных показателей, имеющих различную физическую природу, удобно использовать функцию желательности Харрингтона. Это одна из наиболее популярных в математике функций желательности, которая задается следующей формулой:

$$y = e^{-e^{-x}},$$

где x – кодированное значение признака.

В качестве аргумента в функции желательности используются кодированные значения, представляющие собой положительные или отрицательные целые числа. От количества интервалов, задаваемых кодами, зависит крутизна наклона функции. Обычно используют шесть интервалов в сторону возрастания и шесть в сторону убывания (для более крутой кривой) либо по три интервала (для более пологой). Функция Харрингтона имеет несколько критических точек, что позволяет задавать границы градаций желательности не произвольным, а строгим образом. Точки перегиба имеют ординаты 0,8; 0,63; 0,37; 0,2. Они задают стандартные отметки на шкале желательности: «очень хорошо» (1,00–0,80), «хорошо» (0,80–0,63), «удовлетворительно» (0,63–0,37), «плохо» (0,37–0,20), «очень плохо» (0,20–0,00). Построение шкалы желательности, т.е. задание соответствия между кодированными откликами и натуральными значениями, осуществляется чисто субъективно.

Применение функции Харрингтона возможно в различных сферах: в медицине, экономике, экологии, технике и т.д. В экономике функция желательности может применяться для оценки уровня социально-экономического развития региона; оценки конкурентоспособности предприятия, товара; реализации методики краткосрочного финансового планирования; оценки эффективности инвестиционных проектов. Функция желательности часто используется в теории принятия решений при рассмотрении многокритериальных задач [1]. В этом случае функция желательности представляет собой обобщенный показатель, по величине которого можно классифицировать изучаемые объекты. Функция желательности может быть вычислена по формуле:

$$\mathrm{D} = \sqrt{\prod_{k=1}^{n} d_k},$$

она представляет собой среднее геометрическое функций желательности d_i по каждому из n классифицируемых объектов.

При проведении аттестации спасателей и граждан, приобретающих статус спасателя, определяется знание и умение:

1) прав, обязанностей и ответственности спасателя;
2) документов, регламентирующих организацию и ведение газоспасательных работ;
3) определять необходимость применения и время защитного действия различных средств индивидуальной защиты в зависимости от свойств и концентрации опасных веществ;
4) проверять работоспособность и применять средства индивидуальной защиты органов дыхания и кожи;
5) осуществлять химическую разведку, определять состав атмосферы

экспресс-газоанализаторами, отбирать пробы воздуха;

6) выполнять разведку в загазованной зоне, поиск и спасение пострадавших в условиях непригодной для дыхания атмосферы, угрозы взрыва и обрушения, высоких и низких температур, плохой видимости, ограниченного пространства и других обстоятельствах, осложняющих организацию и ведение газоспасательных работ;

7) оказывать первую помощь пострадавшим в загазованной зоне, выбирать способы и эвакуировать пострадавших в зависимости от наличия и характера травм, количества пострадавших, численности и оснащения спасателей;

8) оказывать первую помощь пострадавшим, эвакуированным из опасной зоны, при химических, механических, электрических травмах, ожогах, обморожениях, в том числе с применением портативных аппаратов искусственной вентиляции легких;

9) выполнять операции по локализации и ликвидации аварий и чрезвычайных ситуаций в условиях выбросов в окружающую среду химически опасных и взрывопожароопасных веществ, снижении концентрации кислорода менее 18% объемных;

10) вести радиосвязь, знать веревочные и визуальные сигналы, применяемые при ведении газоспасательных работ, производить дегазацию средств индивидуальной защиты и оборудования;

11) владеть методами и способами безопасного проведения газоспасательных работ на высоте (для профессиональных АСС и АСФ) [2].

Мы предлагаем по каждому из 11 перечисленных выше критериев ставить от одного до 20 баллов в зависимости от результата, затем, исходя из поведения функции Харрингтона, перевести результаты в шкалу от –3 до 3, по каждому из критериев найти значение функции Харрингтона, затем найти значение обобщенного критерия, который можно считать рейтингом спасателя, и использовать этот показатель для принятия дальнейших решений, связанных с управлением. К примеру, если были получены следующие баллы по одиннадцати пунктам: 10; 12; 14; 15; 20; 17; 18; 16; 17; 15; 19, то расчеты показывают, что значение рейтинга в этом случае будет равно 85 (по шкале от нуля до 100).

В заключение можно сказать, что предложенная методологическая концепция оценки работы спасателей может быть использована во всех профессиональных областях в удобном для программирования и электронной обработки результатов виде. В зависимости от профессиональной специфики возможно изменение количества и содержания предложенных показателей вычисления по каждому отдельному показателю. Представленная идея может быть использована для организации комплексной оценки работы спасателей.

Литература

1. *Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 280 с.
2. Методические рекомендации по проведению аттестации аварийно-спасательных служб, аварийно-спасательных формирований, спасателей и граждан, приобретающих статус спасателя, на право ведения газоспасательных работ. Межведомственная комиссия по аттестации аварийно-спасательных формирований, спасателей и образовательных учреждений по их подготовке. М.: 2012. 53 с.

УДК 502/504

Исследование физической сущности и особенностей возникновения и развития ураганов в Российской Федерации

А.А. Хетагуров, В.Э. Буздин

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Ежегодно количество чрезвычайных ситуаций природного характера в среднем увеличивается. На сегодняшний день известно, что ураганы приносят ощутимый ущерб Российской Федерации. В настоящее время возникла острая необходимость в создании технологии предотвращения стихийных бедствий, связанных с ураганами. В этом состоит актуальность темы исследования.

В настоящее время известно определенное количество способов по предотвращению ураганов. Суть данной работы состоит в анализе наиболее актуальных из них. Ураган – это автономно развивающаяся термодинамическая система (тепловая машина Карно), в которой имеются два температурных уровня: высокий (температура океана), низкий (верхнего слоя тропосферы) и теплоноситель – водяной пар. Выделяемая энергия черпается из тепловой энергии океана и потенциальной энергии высотной неустойчивости атмосферы, переходящих в кинетическую энергию вихря. Пока ураган движется над океаном, его сила нарастает, но, выйдя на сушу, он теряет связь с энергетическим источником и быстро, за несколько дней, затухает, успев, однако, наломать немало дров. Разрушительная сила урагана заключается не только в его огромной скорости и мощи ветра, но и в обилии влаги, вызывающей проливные дожди, наводнения, сели, обвалы.

Существует теория о том, что снизить разрушительную силу урагана можно увеличив давление воздуха в его сердце. Сколько-нибудь эффективных способов, средств и технологий снижения давления воздуха в центре циклона пока не существует. Однако разумнее гасить ураганы на этапе формирования, пока они не вошли в полную силу. Основная идея состоит в том, чтобы лишать ураганы подпитки – резко уменьшить испарение воды с поверхности океана. Для этого рассматриваются разные способы. Один из них – тонкий слой органического материала (что-то вроде нефтяной плёнки) на поверхности воды, который бы хорошо сохранялся в штормовую погоду и саморазрушался без всяких следов несколько дней спустя. В данном случае ураган теряет свою разрушительную силу.

Пока эксперименты с поверхностными плёнками находятся в самой начальной стадии, но нельзя отрицать эффективность данного метода.

Литература

1. Постановление Правительства Российской Федерации от 30 декабря 2003 г. № 794 «О единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций».

УДК 502/504

Анализ физической сущности и особенностей возникновения и развития вихревых процессов различных видов (ураганы, смерчи, шторма) в атмосфере Земли

В.Э. Буздин, А.А. Хетагуров, А.А. Подкопаев, И.Б. Линицкий, И.Ю. Яковлева

Московский физико-технический институт (государственный университет)

С каждым годом число чрезвычайных ситуаций природного характера в среднем увеличивается. На данный момент известно, что ураганы, смерчи и шторма приносят колоссальный ущерб всему миру и Российской Федерации, в частности. В настоящее время возникла острая необходимость в создании технологии предотвращения стихийных

бедствий, связанных с ураганами, смерчами и штормами. Это говорит об актуальности темы исследований.

Существует множество способов и теорий по предотвращению ураганов. Суть данной работы состоит в анализе наиболее актуальных из них. Так как ураган представляет собой очень сильный ветер, скорость которого превышает 120 километров в час – он несется с бешеной скоростью и способен смести со своего пути целые города. Это страшная опасность, сотни погибших, разрушенная экономика, уничтоженные города.

Существует теория о том, что снизить разрушительную силу урагана можно увеличив давление воздуха в его сердце. Сколько-нибудь эффективных способов, средств и технологий снижения давления воздуха в центре циклона пока не разработана. Однако учеными Всероссийского научно-исследовательского института по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (федеральный центр) в последние годы разработаны современные способы, средства и технологии предотвращения возникновения ураганов на базе электрофизических методов воздействия на атмосферные процессы. Суть способа – в предотвращении контрастного столкновения теплой и холодной воздушных масс за счет прогрева холодной воздушной массы с использованием специальных ионизаторов атмосферного воздуха типа «ГИОНК». В данном случае давление увеличивается, и ураган теряет свою разрушительную силу.

С экономической точки зрения данная установка является чрезвычайно полезной и эффективной для выполнения поставленной задачи. Затраты на нее мизерные в сравнении с ущербом, который может нанести потенциальный ураган. Данная установка уже активно используется для решения различных научно-исследовательских проблем, связанных с погодными катаклизмами.

Литература

1. Постановление Правительства Российской Федерации от 30 декабря 2003 г. № 794 «О единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций».

УДК 355.58 (082)

Современные способы борьбы с наводнениями, вызываемыми осадками

Ю.В. Подрезов

Московский физико-технический институт (государственный университет)
Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России

Анализ литературных источников свидетельствует о большой разрушительной силе наводнений и возможностях борьбы с ними современными способами и средствами [1–4].

Выделяются естественные и антропогенные причины наводнений.

Рассмотрим основные естественные причины наводнений. К ним относятся гидрологические явления: формирование выдающихся половодий и паводков, затяжные дожди и ливни. Естественными причинами речных наводнений могут быть также особенности зимнего режима некоторых рек, гидродинамическое взаимодействие морей (океанов) и рек в дельтах и устьях, оползни и обвалы в долинах предгорных и горных участков водостоков, вызываемые тектоническими процессами в земной коре [1].

Наводнения, порождаемые естественными причинами, происходят не только в речных долинах. Они возникают во время сильных ливней в городах, если не обеспечен быстрый естественный или искусственный отвод выпавших осадков с их территории; на равнинной местности с плоским рельефом, если на ней отсутствует или слабо развита речная или искусственная дренажная сеть; в замкнутых котловинах. В определенных топографических условиях причиной наводнений могут быть не только ливни, но и интенсивное снеготаяние, если оно сопровождается дождями.

Основная задача борьбы с речными наводнениями состоит в том, чтобы создать в речном бассейне условия, благоприятствующие выравниванию процессов стекания воды по земной поверхности. Это выравнивание достигается комплексом мероприятий, проводимых в начальных звеньях гидрографической сети, и регулированием стока с помощью водохранилищ. Эти мероприятия - агротехнические, лесомелиоративные, полезащитные - позволяют ослабить процессы поверхностного стока и эрозию. Однако огромные массы воды, поступающие в речные системы при особо благоприятных условиях формирования стока и вызывающие выдающиеся наводнения, могут быть эффективно задержаны лишь в водохранилищах, специально создаваемых для борьбы с наводнениями [2].

Многие наводнения в нашей стране и за рубежом вызываются ливневыми или продолжительными осадками. В настоящее время в результате появления способов, средств и технологий воздействия на атмосферные процессы с использованием электрофизических методов воздействия появилась возможность предотвращать наводнения, вызываемые обильными осадками. Созданы специальные ионизаторы атмосферного воздуха типа “ГИОНК” (генератор ионов кислорода), способы и технологии воздействия на атмосферные процессы с использованием указанных ионизаторов и их комплексов, реализующие экологически чистый электрофизический метод. При этом скопирована атмосферная машина по формированию метеоусловий.

Сущность способов борьбы с наводнениями на основе коррекции погодных условий указанными способами и технологиями заключается в предотвращении или прерывании выпадения ливневых или продолжительных осадков над определенными территориями (руслами рек, водоемами и т.п.) в заданный период времени.

На основе теоретических и натурных экспериментальных работ сделан вывод о том, что создание перспективных и универсальных способов и средств управления атмосферными процессами на базе электрофизических методов воздействия позволяет гарантированно решать комплексы прикладных задач в области обеспечения безопасности населения и территорий от наводнений, вызываемых ливневыми и продолжительными осадками.

Литература

1. http://knowledge.allbest.ru/life/3c0a65625b3ad68a5c43a89521306c36_0.html.
2. http://www.aif.ru/infographic/1007993.
3. https://www.kazedu.kz/referat/55320/1.
4. Физика облаков и активных воздействий // Труды ордена Трудового Красного Знамени Главной Геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. Выпуск 389. /Под ред. канд. физ.-мат наук Т.Н. Громовой, канд. физ.-мат наук Ю.А. Довгалюк. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1977. 296 с.
5. *Матвеев Л.Т.* Физика атмосферы. Издание третье, переработанное и дополненное. Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 2000. 684 с.
6. *Подрезов Ю. В., Шахраманьян М.А.* Управление погодой – не миф, а реальность. М.: ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2004. 54 с.
7. http://big-archive.ru /.
8. Патент на полезную модель №33824. Система предупреждения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. Авторы: Шахраманьян Михаил Андраникович, Подрезов Юрий Викторович. Зарегистрирован в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 10 ноября 2003 года.
9. *Подрезов Ю.В.* Анализ основных климатических изменений на Земле и возможные их последствия. // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2012. № 2. С. 24-36.
10. *Подрезов Ю.В.* Анализ особенностей загрязнения атмосферы городов // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2013. № 2.С.17–27.
11. *Подрезов Ю.В.* Анализ исторических аспектов работ по воздействию на атмосферные процессы. // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2015. № 1. С. 37–51.
12. *Подрезов Ю.В.* Проблемные аспекты исследований по активным воздействиям на атмосферные процессы //Журнал «Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2015. № 3. С. 41 - 51.
13. *Подрезов Ю.В.* Основные особенности формирования погодных процессов в атмосфере Земли. // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2015. № 5. С. 18–29.

14. *Агеев С.В., Подрезов Ю.В., Романов А.С., Виноградов А.В., Тимошенко З.В.* Теоретические исследования и экспериментальные работы отечественных ученых в области физики облаков. // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2016. № 1. С.32–44.

УДК 330.46

Количественный анализ данных по биолого-социальным чрезвычайным ситуациям в Российской Федерации за 2000 – 2015 годы

Е.А. Железнякова[1], Л.Р. Борисова[1,2]

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2]Финансовый университет при Правительстве РФ

Население России постоянно находится под угрозой возникновения чрезвычайных ситуаций, которые вызваны явлениями техногенного, биолого-социального и природного характера. Тяжелые последствия приносят биолого-социальные чрезвычайные ситуации, поэтому им стоит уделить особое внимание.

Биолого-социальные ЧС тормозят развитие государства, они влекут за собой ущерб здоровью людей и окружающей природы, человеческие жертвы, материальные потери и нарушение жизнедеятельности людей. Спасатели МЧС принимают участие в ликвидации биолого-социальных чрезвычайных ситуаций, и это помогает уменьшить число жертв ЧС. В последние годы жертв биолого-социальных ЧС удалось избежать, однако количество пострадавших сильно увеличилось. Поэтому анализ динамики биолого-социальных ЧС остается актуальной задачей.

Целью работы было проведение статистического анализа данных по биолого-социальным ЧС, представленных в государственных докладах «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» в 2000 – 2015 годах [1].

Статистический анализ данных позволяет установить закон распределения изучаемой случайной величины. Поскольку мы предполагаем, что закон распределения количества ЧС должен быть нормальным, то проще найти экспериментальную квантиль распределения и сравнить ее с теоретической. На рис.1 представлены данные такого сравнения.

Из коэффициента детерминации, указанного на рис. 1, легко получить коэффициент корреляции между экспериментальной и теоретической квантилями, который равен 0,92.

Количество биолого-социальных ЧС, связанных с инфекционной заболеваемостью людей, также случайно и не имеет тенденции к увеличению. Распределение количества таких ЧС является нормальным, о чем свидетельствуют результаты анализа данных государственных докладов, представленные на рис. 2.

Мы проанализировали данные по динамике распространения СПИД в Российской Федерации, представленные в работе [2]. Статистический анализ и в этом случае показал, что закон распределения инфекционных заболеваний, связанных с ВИЧ-инфекцией, нормальный.

Данные о законах распределения количества чрезвычайных ситуаций можно использовать при разработке моделей прогноза биолого-социальных ЧС, в том числе связанных с ВИЧ-инфицированием.

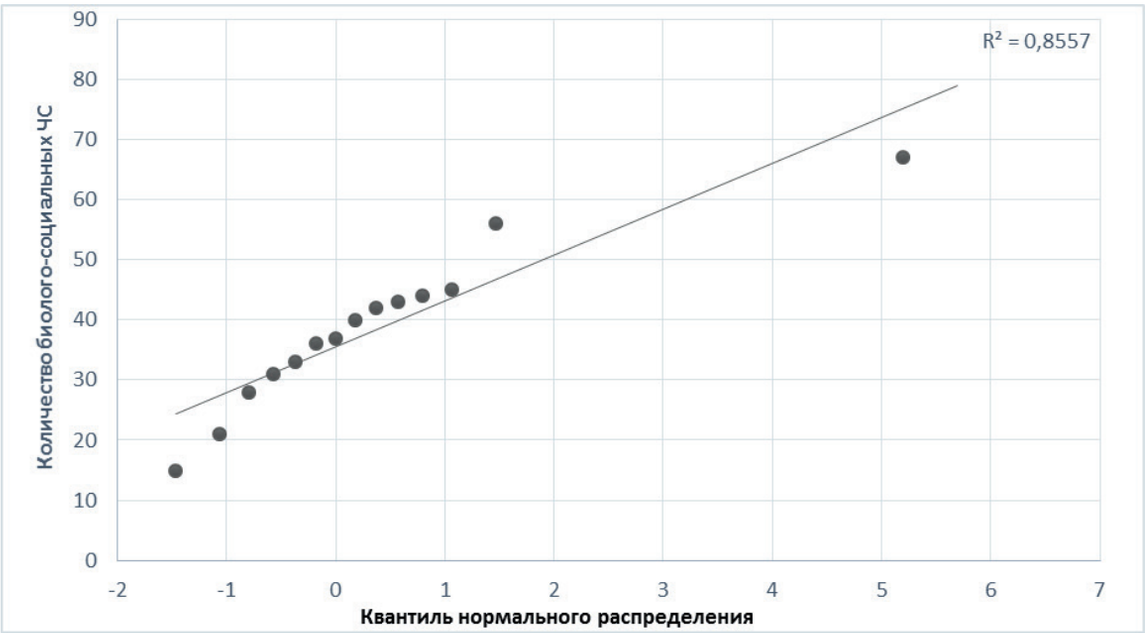


Рис. 1. Экспериментальная и теоретическая (нормальная) квантили числа биолого-социальных ЧС за 2000 – 2015 гг.

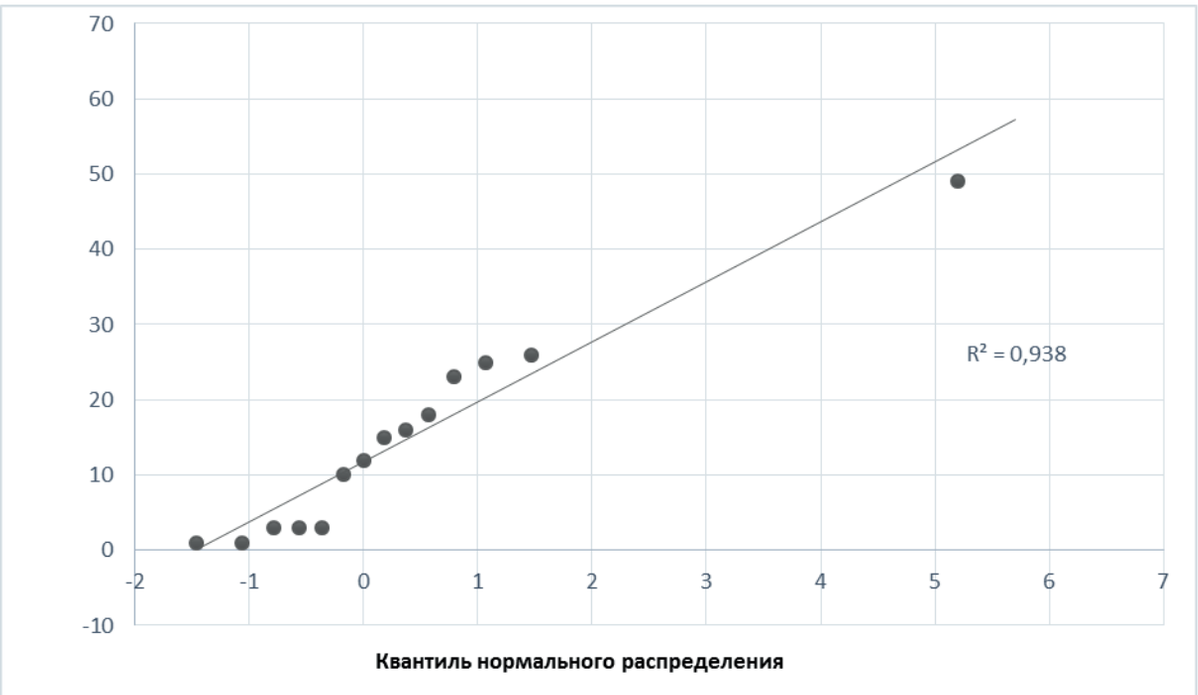


Рис. 2. Экспериментальная и теоретическая (нормальная) квантили числа биолого-социальных ЧС, связанных инфекционной заболеваемостью людей за 2000 – 2015 гг. (по оси *y* отмечено количество ЧС с инфекционной заболеваемостью людей)

Литература

1. Государственный доклад о состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2000 – 2015 гг. М.: МЧС России. ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ).
2. http://www.spb.kp.ru/daily/26618/3635894/

УДК 528.721.2

Эпиполярная геометрия в задачах обработки изображений

Р.К. Анойкин

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Моя работа посвящена решению задачи программной реализации автоматического алгоритма построения эпиполярного ресэмплинга для изображений. На вход алгоритму поступают данные модели сенсора камеры и отснятые кадры изображений.

Для установления соответствия между координатами изображения и географическими координатами с помощью многочленов используется модель RPC (Rational Polynomial Coefficients). Она широко распространена вследствие того, что не требует ни значительных вычислений, ни раскрытия физической модели камеры.

При использовании модели RPC можно вычислить нормализованную колонку и строку в изображении как коэффициенты многочленов геодезической широты, долготы и высоты.

На рис. 1 представлена схема определения направления проектирования. Точка *a* является случайно выбранной точкой на левом изображении, прямой луч проекции которой обозначим через *R1*. Точки *p*1 и *p*2 – две точки, принадлежащие лучу *R*1, лежащие выше и ниже плоскости проекции с перепадом высот *h*. Точки *b* и *c* – обратные проекции точек *p*1 и *p*2 на правом изображении, принадлежащие обратному лучу проекции *R*2. Точки *p*3 и *p*4 – это точки, соответствующие пересечениям лучей *b* и *c* с плоскостью проектирования соответственно.

Основные этапы алгоритма:

1. При дополнительном вводе необходимых данных высоты и разницы высот над плоскостью проекции происходит построение линии направления проектирования.

2. Происходит построение координатной сетки в плоскости проекции. Для каждого пикселя сетки выполняется перевод координат в координаты на эллипсоиде Земли.

Данные, получаемые при решении задачи, могут быть использованы для решения проблем топливно-энергетического комплекса, лесного и сельского хозяйства, строительства, недропользования, предотвращения чрезвычайных ситуаций, мониторинга экологического состояния и т.д.

В результате выполнения работы был разработан алгоритм эпиполярного ресэмплинга для изображений.

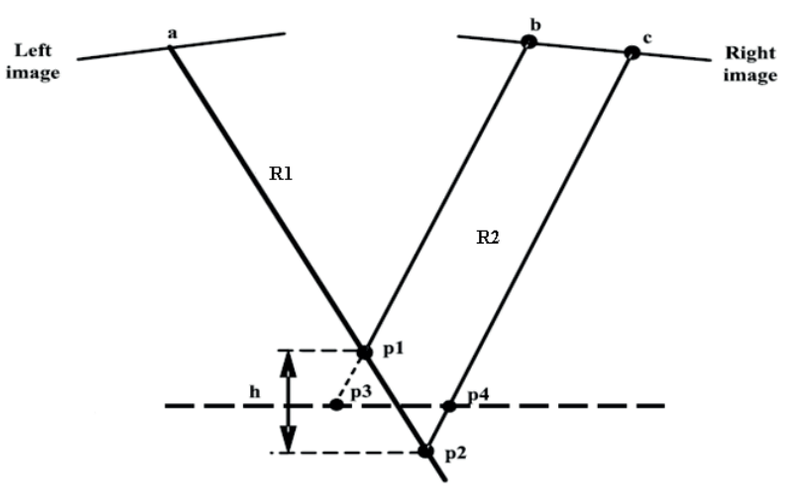


Рис.1. Определение направления проектирования

Литература:

1. *Wang Mi, Hu Fen, Li. Jonathan.* Epipolar resampling of linear pushbroom satellite imagery by a new epipolaritymodel // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2011.V. 66.P . 347–355.

УДК 316.014

Моделирование поведения толпы в условиях чрезвычайной ситуации

***Е.И. Генералова*[1], *Л.Р. Борисова*[1,2]**

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2]Финансовый университет при Правительстве РФ

В настоящий момент моделирование толпы представляет собой развивающуюся область науки во многом благодаря процессу мировой глобализации и увеличению численности населения на Земле. Как известно, крупные города привлекают к себе все большие количества иммигрантов, что увеличивает нагрузку на транспортную систему таких городов, и усложняет процессы городского планирования. Необходимость расчета параметров людского и транспортного потока породила особый класс геоинформационных систем: симуляторов толпы, дающих возможность измерения, оптимизации и визуализации подобных потоков.

Моделирование позволит разработать рекомендации специалистам, помогающие обеспечивать высокий уровень безопасности в обыденных и экстремальных ситуациях, оптимизировать различные здания и сооружения с точки зрения эффективности прохождения людского потока, а также эффективно управлять транспортным потоком.

Понимание коллективной динамики движения толпы во время стрессовых чрезвычайных ситуаций является центральным для снижения риска смертельных стихийных бедствий. Однако их систематические экспериментальные исследования по-прежнему остаются сложной открытой проблемой из-за этических и методологических ограничений. Динамика толпы подразумевает серьезные теоретические и реальные проблемы [1].

Целью данной работы является разработка и анализ моделей поведения толпы в условиях ЧС.

Для достижения этой цели потребовалось решение следующих задач:

1. Разработка и аналитическое решение модели трансформации толпы из неагрессивной в агрессивную;

2. Разработка и численное решение модели толпы, которая может находиться в разных состояниях по степени возбуждения факторами ЧС;

3. Моделирование движения толпы в замкнутом пространстве.

Рассмотрим толпу в качестве системы, включающей несколько взаимодействующих агентов. Каждый из агентов может находиться в одном из двух состояний: «*A*» (действовать, то есть быть в возбужденном состоянии) или «*B*» (бездействовать, быть в нормальном, невозбужденном состоянии).

Ближайшее окружение влияет на агента при принятии им решения действовать или бездействовать. Будем считать, что существует пороговое значение, которое необходимо для перехода из одного состояния в другое. Определим «равновесное состояние» толпы через функцию распределения порогов агентов $F(x)$.

Обозначим долю первично возбуждаемых агентов за параметр λ. В результате возбуждения пороги агентов будут описываться следующей функцией распределения:

$$F\lambda(x) = \lambda + (1 - \lambda)F(x).$$

Пусть к множеству агентов N добавляется множество внешних провокаторов, численность которых примем за K. У провокаторов нет пороговой величины. Они всегда активны, то есть находятся в состоянии «*A*». Вероятность того, что произвольно выбранный агент из любого из двух множеств (активных или пассивных) имеет порог, не

превышающий x, можно найти из основных теорем теории вероятностей: вероятность того, что выбранный агент является провокатором, находится по формуле:

$$P = k / (n + k),$$

где n – численность агентов, k – численность провокаторов.

Вероятность того, что выбранный агент не является внешним провокатором, находится по формуле: $P = (1 – k / (n + k))$.

В этой модели пороги агентов являются независимыми и одинаково распределенными с функцией распределения:

$$F\lambda(x) = k / (n + k) + (1 – k / (n + k)) F(x).$$

Вычисление вероятностей может служить основой прогноза изменения состояния толпы и отправной точкой для вмешательства в потенциально опасный процесс трансформации толпы из обычной в агрессивную.

Динамику толпы можно анализировать при помощи уравнений переходов от одного состояния к другому. Будем считать, что толпа может находиться в одном из четырех состояний: S_1 – основное состояние толпы, когда паника отсутствует; S_2 – состояние толпы при обратимом внешнем воздействии или при наличии провокаторов в среде (агрессивная толпа); S_3 – состояние толпы при необратимом внешнем воздействии, каким может быть, к примеру, теракт (спасающаяся толпа); S_4 – состояние толпы в условиях паники (паническая толпа). Граф переходов между такими состояниями представлен на рис. 1.

Данному графу соответствует следующая система дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{dS_1}{dt} = -(k_1 + k_2)S_1 + \mu S_2, \\ \dfrac{dS_2}{dt} = -k_4 S_2 + k_1 S_1 - \mu S_2, \\ \dfrac{dS_3}{dt} = -k_3 S_3 + k_2 S_1, \\ \dfrac{dS_4}{dt} = k_4 S_2 + k_3 S_3. \end{cases}$$

Численно (в Mathcad) решили данную систему при следующих начальных условиях:

$$S_1(0) = S_0,\ S_2(0) = 0,\ S_3(0) = 0,\ S_4(0) = 0.$$

Проанализировали все возможные вариации параметров модели, в том числе рассмотрели случаи, когда константы скоростей переходов из одного состояния в другое являются линейными или квадратичными функциями от численности толпы в конкретном состоянии. Получили, что при наличии постоянно действующего внешнего воздействия толпа практически мгновенно становится агрессивной.

Были рассмотрены возможности движения человека из толпы в разных направлениях в условиях ЧС в замкнутом пространстве с ограниченным числом выходов. Оптимальное время покидания замкнутого помещения совпало со временем, которое отводится на эвакуацию.

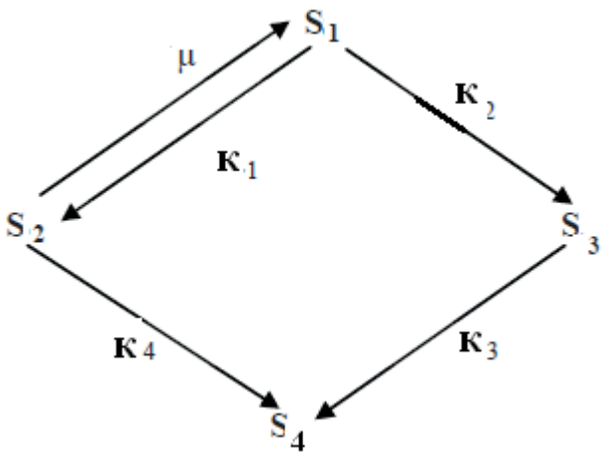


Рис. 1. Граф переходов для состояний толпы

Литература

1. *Moussaid M, Helbing D, Theraulaz G.* How simple rules determine pedestrian behavior and crowd disasters // Proc. Natl Acad. Sci. USA. 20110. V. 108. P. 6884–6888.

УДК 004.355

Стратегические рекомендации и дополнения к проекту «Безопасная столица»

А.А. Подкопаев, А.А. Хетагуров, В.Э. Буздин, И.Б. Линицкий

Московский физико-технический институт (государственный университет)
Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России

Целью данной работы является дача некоторых рекомендаций по вхождению Москвы в десятку рейтинга столиц – миллионников по безопасности.

Всесторонние научные исследования в области предотвращения и профилактики ЧС проводились ранее и ведутся сегодня в Федеральном центре науки и высоких технологий “Всероссийский научно — исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций” МЧС России [1].

В данной работе были рассмотрены различные способы организации работы со школьниками с целью улучшить навыки, необходимые для правильных действий во время ЧС различного характера.

Статистически лидирующим по числу пострадавших и погибших в прошлом 2016 году являются пожары и ЧС техногенного характера.

Чаще всего пожары в городе Москве происходили по причине неосторожного обращения с огнём – 2 611 случаев (47,4% от общего количества), в т. ч. от курения – 1 413 (25,6%). Следующими по частоте причинами возникновения пожаров являются нарушения правил устройства и эксплуатации электрооборудования (1 676 случаев или 30,4%) и транспортных средств (553 случая и 10%).

Поэтому предложено выделить часть сил и средств на решение этой проблемы. Статистика показывает, что эффективнее всего проявляет себя реклама в Интернете. В данной работе были предложены несколько примеров социальной рекламы.

Следующим пунктом по количеству смертей идет ДТП с тяжкими последствиями. Тут также предложена реклама для соц. сетей.

Далее по статистике выступают биолого-социальные и инфекционные ЧС. Исследование показало, что 1) Заболевания нижних дыхательных путей недооценены, 2) Лучшая профилактика – прививки.

Статистика показывает, что в случае травм, полученных на улице, образуется толпа зевак, но среди них редко оказываются те, кто звонит в скорую помощь. В связи с этим в данной работе были предложены примеры социальной рекламы службы 112.

Литература

1. Постановление Правительства Российской Федерации от 30 декабря 2003 г. № 794 «О единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций».

УДК 62-932.4

Квадрокоптеры на службе арктических подразделений МЧС

А.А. Гончаров

Московский физико-технический институт (государственный университет)

В наше время, как, впрочем, и всегда, Арктика является главной стратегической зоной страны в силу ряда причин: экономических и политических. В связи с этим Арктическая зона активно развивается, тому служат многочисленные примеры: Ямал СПГ, Северный морской путь и, конечно, создание специальных подразделений МЧС для работы на территории Арктики.

В Федеральном центре науки и высоких технологий «Всероссийский научно — исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций» МЧС России вплотную занимаются Арктическим вопросом. А именно, работают над модернизацией и созданием техники, способной работать при пониженных температурах и в условиях отсутствующей инфраструктуры.

В данной работе рассматривается на оснащение Арктических подразделений МЧС не в классическом ракурсе. Не ставилась цель модернизации, какой-либо техники подразделений, хотя впоследствии к этому пришли. На вопрос, что может помочь спасателям в условиях Арктики, ответ оказался довольно простым — это были квадракоптеры.

Ознакомившись с многочисленными материалами по этой теме, было выявлено несколько основных проблем использования квадракоптеров в условиях Арктики. В основном они были связаны с сильно низкими температурами. А что касается ветра, свойственного арктическим территориям, то тут, судя по проведенным экспериментам, техника демонстрирует превосходные результаты. Также в работе выявлены основные производители квадрокоптеров на мировом рынке, и более детально рассмотрены технические возможности квадрокоптеров фирмы DJI, так как одно из подразделений МЧС (не арктических), уже использует беспилотные средства этой фирмы.

Для всех квадрокоптеров фирмы DJI справедливо следующее:
- возможность полетов при порывистом ветре;
- проблемы с аккумулятором при низких температурах;
- возможность передачи видеосигнала на расстояние более полутора километров.

Способы применения в работе спасателей:
- мониторинг ситуации в режиме реального времени;
- подвоз малогабаритных грузов в труднодоступные районы;
- выполнение поисково-спасательных операций с минимальными затратами;
- оценка последствий ЧС.

Выгода от использования квадрокоптеров:
- малые затраты в эксплуатации;
- возможность привлечения частных инвесторов;
- идти в ногу со временем.

В работе были выявлены проблемы, нуждающиеся в рациональном решении:
- повышение кпд электронных батарей;
- создание Интернет контента;

- привлечение денежных инвестиций;
- внедрение квадрокоптеров в арсенал арктических подразделений.

В конце работы был предложен ряд решений этих проблем, но это лишь план, а не практическая реализация. Вывод можно сделать такой: Квадракоптеры – техника очень полезная, но нуждающаяся в доработке для Арктических условий.

Литература

1. Постановление правительства Российской Федерации от 30 декабря 2003 г. № 794 «О единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций».
2. Постановление правительства Российской Федерации от 29 мая 2008года. № 404 «О Министерстве природных ресурсов и экологии Российской Федерации».
3. Постановление правительства Российской Федерации от 4 октября 2011 года. № 806 «О Министерстве природных ресурсов и экологии Российской Федерации».
4. *Сивухин Д.В.,* Общий курс физики. Механика. Т. I. М.: Наука, 1979.
5. *Сивухин Д.В.,* Общий курс физики. Термодинамика и молекулярная физика. Т. II. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
6. *Карасева Е.А., Карасева Т.В., Рытова Т.Г.,* Разработка отечественной навигационной базы для квадрокоптера // Приволжский научный вестник. 2016.

УДК 330.46

Эконометрический анализ данных учений по эвакуации работающих на объекте экономики в условиях, приближенных к ЧС

И.А. Малашкина[1], Л.Р. Борисова[1,2]

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2]Финансовый университет при Правительстве РФ

В настоящее время проблемой всего человечества является увеличение степени риска возникновения ЧС природного и антропогенного происхождения. Стихийные бедствия стали глобальной проблемой всего мира. Из опыта войн известно, что самой эффективной защитой населения от любых средств нападения является вывод его за границы зон поражения. Самым надежным способом защиты населения является эвакуация из зоны ЧС [1]. Вероятность обеспечения безопасности людей в начальной стадии ЧС в большей степени зависит от времени их эвакуации. Вывоз людей из опасных зон должен осуществляться в короткие сроки при достижении минимального воздействия на них поражающих факторов источника ЧС. Рассчитать нужные параметры эвакуации возможно с применением методов математической статистики, теории вероятности, математического программирования. Проведение учений по эвакуации на объектах экономики или в муниципальных образованиях позволит на основе математической модели проанализировать влияние отдельных параметров эвакуации на результат эвакуации.

Пусть было проведено пять учений. Изучим зависимость времени эвакуации от двух факторов: величины основных материальных средств, затраченных на эвакуацию, и численности спасателей. Введем обозначения: y(мин) – время эвакуации (зависимая величина или функция); x – численность спасателей; z (у.е) – величина основных материальных средств, затраченных на эвакуацию. В таблице представлены результаты учений.

При помощи Excel проанализируем данные. Используем инструмент Excel «Анализ данных». По данным таблицы построим уравнение множественной регрессии и проанализируем информацию протокола Excel.

Уравнение множественной регрессии имеет вид: $y = a_o + a_1x + a_2 z$.

При помощи Excel получили решение этой системы: $a_0 = – 19{,}6747$; $a_1 = 3{,}08$; $a_2 = 0{,}0187$.

Уравнение множественной регрессии будет иметь вид: $y = –19{,}67 + 3{,}08x + 0{,}0187 z$.

Качество построенной функции оценивается в Excel по коэффициенту детерминации R_y^2, который равен 0,95.

Таким образом, доля неучтенных факторов в уравнении функции составляет всего 0,05 или 5%.

Вычислим коэффициенты эластичности для построенной функции.

В точке $x = 12$; $z = 1250$; $E_x = 0,9$.

При изменении x на 1% время, затрачиваемое на эвакуацию, изменится на 0,9%.

В этой же точке $x = 12$; $z = 1250$; $E_z = 0,57$.

При изменении z на 1% время, затрачиваемое на эвакуацию, изменится на 0,57%.

Получается, нельзя сделать вывод, что время, затрачиваемое на эвакуацию, более чувствительно к изменению величины основных материальных средств, затраченных на эвакуацию, чем изменение численности спасателей.

Проведение учений по эвакуации на объекте экономики и последующий анализ серии таких учений позволяет грамотно рассчитать силы и средства, которые необходимо поддерживать в должном состоянии на случай экстренной эвакуации работающих с предприятия.

Таблица 1.

Результаты учений

Варианты:	*Y*, мин	*X*, чел.	*Z*, у.е.
1	38	10	1400
2	37	11	1200
3	37	11	1300
4	41	12	1250
5	43	13	1200

Литература

1. http://www.plan-evakuacii.ru/stati/evakuaciya-kak-samyj-nadezhnyj-sposob-obespecheniya-bezopasnosti-v-usloviyax-chs.html

УДК 502/504

Оценка последствий и исследование возможностей, способов и средств борьбы со смерчами

А.К. Поляков

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Каждый год атмосферные вихри наносят огромный ущерб объектам экономики и окружающей природной среды и нередко приводят к человеческим жертвам. Поэтому оценка последствий и исследование возможностей, способов и средств борьбы со смерчами являются весьма актуальными.

В основе смерчей лежит вихревое движение. Оно является одной из самых распространённых форм движения воздуха. Существуют много разновидностей вихревых движений атмосферного воздуха, различающихся размерами, характерными скоростями и временами жизни (смерчи, торнадо, ураганы). Несмотря на попытки ученых предложить возможные способы воздействия на эти процессы, к настоящему времени способы решения отсутствуют.

Одними из основных задач борьбы со смерчами являются: оценка вероятности возникновения данного явления и прогнозирование его движения, оценка последствий смерчей. Более того, необходимо исследовать возможности ослабления и уничтожения вихревой структуры. Говоря о методах, их делят на пассивные (постройка дамб,

укрепление фасада зданий, разработка систем реагирования) и активные. Активные методы делятся на превентивные и прямые методы.

Превентивные методы делятся на два основных класса: разогрев верхней части урагана и охлаждение снования вихревой структуры. Для разогрева облаков используют метод распыления частиц углерода, в качестве которых использую сажу. Темные частицы интенсивнее поглощают солнечную энергию и позволяют разогреть рассматриваемый участок. Еще один способ – нагревать с помощью микроволнового излучения. Для расхолаживания основания используют дождевые облака, которые засеивают частицами пыли. Это ведет к тому, что эти частицы абсорбируют воду, но капли будут слишком малы для выпадения осадков. Поэтому, они будут подниматься вверх и испарятся. Так как процесс испарения эндотермический, значит основание будет охлаждаться. Перечисленные процессы очень капиталоемкие, поэтому перспективным кажется взрывной метод. С помощью беспилотного летательного аппарата взрывчатка доставляется в эпицентр и происходит детонация. Этот метод имеет свой минус, а именно: сильная мощность детонации, сравнимая с разрушительностью торнадо.

Решение данной проблемы является актуальным, так как эти стихийные бедствия наблюдаются на территории России (краснодарском крае, некоторых районах Подмосковья (в городе Краснозаводск) и т.д.). Используемые методы оценки вероятности возникновения смерчей не могут полностью гарантировать свой успех. Поэтому необходимо проанализировать все плюсы и минусы существующих методов борьбы с вихревыми атмосферными процессами и предложить новые. Наиболее перспективным методом является электрофизический метод коррекции погодных условий.

Литература

1. *Подрезов Ю.В.* Методологические основы прогнозирования динамики и последствий чрезвычайных лесопожарных ситуаций.: дис. М.: МГУЛ, 2005.

УДК 502/504

Оценка последствий и исследование возможностей способов и средств борьбы с ураганами в Российской Федерации

П.К. Игнатьев

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Число чрезвычайных ситуаций природного характера в России увеличивается ежегодно. Одной из самых острых проблем являются ураганы. Например, экономический ущерб от урагана в Москве (29.05.2017), причинённый жилым домам, имуществу и автомобилям, составил около 25 млн рублей. Погибло 18 человек, 170 получили ранения. К сожалению, не до конца исследованы и придуманы пути борьбы и уничтожения ураганов, так что над полным разрешением этой проблемы еще предстоит много работать. В этом заключается актуальность темы исследования.

Для ликвидации урагана или уменьшения его мощности необходимо изначально определить его вид, оценить его размеры, определить объемы работ и необходимые силы и средства для уменьшения мощности или уничтожения урагана. Исходя из этого, модели перемещения ураганов должны учитывать возможные траектории движения ураганов, а главное – их возможную мощность, которая может изменяться в зависимости от внешних воздействий. Правильная оценка траектории и мощности урагана позволят правильно оценить необходимый объем работ и затраченных ресурсов на его ликвидацию или ослабление.

На данный момент проблема прогнозирования траекторий и мощностей ураганов недостаточно изучена, проведено не очень большое количество исследований в данной области. Таким образом, для того чтобы предотвратить потери человеческих жизней,

снизить ущерб населению, окружающей среде и важным для государства объектам, необходимо создать научную базу, включающую согласованный комплекс методических подходов, моделей и методик, которые позволят прогнозировать всю цепочку событий в чрезвычайной ситуации, вызванной ураганом, особенно в прогнозировании последствий крупных ураганов, так как они являются очень опасными для людей и экономики страны в целом.

Литература

1. *Качурин Л.Г.* Физические основы воздействия на атмосферные процессы. Экспериментальная физика атмосферы. Допущено Государственным комитетом СССР по народному образованию в качестве учебника для студентов вузов, обучающихся по специальности «Метеорология». Л.: Гидрометеоиздат, 1990.
2. *Подрезов Ю.В.* Методологические основы прогнозирования динамики и последствий чрезвычайных лесопожарных ситуаций.: дис. на соиск. уч. степ. докт. с.–х. наук. М.: МГУЛ, 2005.

УДК 502.504

Исследование особенностей формирования и развития мультиячейковых градовых облаков

Б.Ш. Нурдинов

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Число чрезвычайных ситуаций природного характера в Российской Федерации и в мире в целом увеличивается год от года. Значительный вред сельскому хозяйству, зданиям и имуществу людей приносит выпадение града, а также повышает риск крушения самолетов. Все это говорит об актуальности исследования особенностей формирования и развития мультиячейковых градовых облаков.

К сожалению, далеко не всегда можно вовремя спрогнозировать выпадение града и предотвратить или значительно снизить ущерб от него, иначе говоря смягчить последствия чрезвычайной ситуации.

Моделирование мультиячейковых градовых облаков позволяет понять механизм их формирования и развития. Появляется возможность спрогнозировать их возникновение, оценить возможные последствия выпадения града, а также оценить потребности в силах и средствах для ликвидации чрезвычайных ситуаций, вызываемых градовыми процессами, включая затраты на ликвидацию таких ЧС.

На сегодняшний день формирование и развитие мультиячейковых градовых облаков недостаточно изучено, проведено недостаточное количество исследований в данной области. Поэтому для предотвращения людских потерь, снижения ущерба населению, окружающей природной среде и объектам экономики необходимо создать научную базу, включающую согласованный комплекс методических подходов, моделей и методик, которые позволят прогнозировать всю цепочку событий в чрезвычайной атмосферной обстановке, особенно в прогнозировании последствий выпадения града, так как оно является особенно опасным.

Литература

1. *Матвеев Л.Т.* Физика атмосферы. Изд. третье, перераб. и доп. С.–Петербург: Гидрометеоиздат, 2000.
2. *Мазин* И.П., Шметер С.М. Облака строение и физика образования. Л.: Гидрометеоиздат, 1983.
3. Искусственное воздействие на облака и осадки (перевод с английского). Л.: Гидрометеоиздат, 1957.

УДК 502/504

Прогнозирование последствий крупных лесных пожаров

Д.А. Ребенок

Московский физико-технический институт (государственный университет)

С каждым годом число чрезвычайных ситуаций природного характера в Российской Федерации и в мире в целом увеличивается. Около 90% ущерба от общего числа лесных пожаров приходится на крупные лесные пожары. К сожалению, далеко не всегда можно ликвидировать лесной пожар в кратчайшие сроки и предотвратить или значительно снизить ущерб от его последствий.

Для ликвидации источника пожара необходимо выбрать оптимальный способ тушения каждого вида лесного пожара, определить объемы работ и необходимые силы и средства для тушения лесного пожара. Исходя из этого, модели развития лесных пожаров должны учитывать динамику всех элементов контура лесного пожара: фронта, флангов, тыла. Понимание развития лесного пожара позволяет моделировать динамику объемов работ по тушению крупных лесных пожаров, потребностей в силах и средствах ликвидации чрезвычайной ситуации, затрат на его ликвидацию и в целом понимания возможного косвенного и прямого ущерба.

На данный момент проблема прогнозирования чрезвычайных лесопожарных ситуаций недостаточно изучена, проведено недостаточное количество исследований в данной области. Поэтому для предотвращения людских потерь, снижения ущерба населению, окружающей природной среде и объектам экономики необходимо создать научную базу, включающую согласованный комплекс методических подходов, моделей и методик, которые позволят прогнозировать всю цепочку событий в чрезвычайной лесопожарной обстановке, особенно в прогнозировании последствий крупных лесных пожаров, так как они являются особенно опасными.

Литература

1. *Подрезов Ю.В.* Методологические основы прогнозирования динамики и последствий чрезвычайных лесопожарных ситуаций.: дис. М.: МГУЛ, 2005.

УДК 502/504

Оценка последствий и исследование возможностей способов и средств борьбы с торнадо

А.Р. Князев

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Торнадо оказывают важнейшее влияние на жизнедеятельность и экономику отдельных регионов. Только на территории США по текущим данным NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) за 2017 год зарегистрировано в общей сумме более тысячи торнадо (эти данные основаны на сборе информации о региональных штормовых предупреждениях, и соответствуют по порядкам величин историческим данным за предыдущие годы). Порядка двух процентов от этого количества относится к категории F5 по шкале Фудзиты–Пирсона. Эти данные иллюстрируют тот факт, что точность предсказания возникновения торнадо и оценка его категории являются критически важными характеристиками.

Несмотря на большое количество исторических данных и активно предпринимаемые усилия со стороны научного сообщества, механизмы возникновения торнадо до сих пор не изучены полностью. Трудности в численном моделировании погодных явлений, а также жесткая зависимость динамики атмосферы от начальных условий (которые на практике не могут быть заданы лишь с конечной точностью)

осложняют задачу предсказания возникновения и оценки последствий торнадо. Используемые в настоящее время модели, такие как MM5 (Метеорологическая Модель 5) и модели NCEP (National Centers for Environmental Prediction) во многом опираются на регрессию по существующим историческим данным. Такие подходы делают подобные модели не универсальными (качество работы модели во многом основано на собранных данных по региону и, соответственно, результаты моделирования часто не могут быть успешно экстраполированы на другие территории). В частности, многие из моделей NCEP активно используют в США, но они не нашли применения в России.

При этом, дальнейшая разработка методов оценки энергий торнадо, основанная на физических принципах может позволить повысить качество прогнозированная и снизить требования к точности и детальности исходных данных. Исследование и численное моделирование механизмов образования торнадо также дадут возможность разработки способов предотвращения и борьбы с ними. Результатом успешного решения данных задач будет появление возможностей к исследованию методов дальнейшей оптимизации средств борьбы с торнадо и предотвращению экономического ущерба.

Литература

1. *Матвеев Л.Т.* Физика атмосферы. Изд. третье, перераб. и доп. С.–Петербург: Гидрометеоиздат, 2000.
2. *Шейнис И.М.* Изменение погоды человеком. Проблемы национальной политики в области природных ресурсов/ под ред. И.П. Мазина. М.: Прогресс, 1972.

УДК 502/504

Методические особенности оценки лесопожарной обстановки на территории субъекта Российской Федерации

С.А. Гареева

Московский физико-технический институт (государственный университет)

С каждым годом число чрезвычайных лесопожарных ситуаций (далее – ЧЛС) в Российской Федерации и в мире в целом увеличивается. Лесные пожары являются одной из основных природных опасностей характерных для нашей страны. В связи с этим большое значение имеет проблема оценки лесопожарной обстановки в целом по стране и по субъектам РФ.

Для успешной борьбы с лесными пожарами – источниками чрезвычайных лесопожарных ситуаций(ЧЛС) – необходимо корректно оценить тенденцию, логику развития прогнозируемого процесса. На принятие решения влияет огромное количество факторов, поэтому важно использовать не только адекватные математические модели оценки лесопожарной обстановки, но точные исходные данные для моделирования, которые позволяет получить современная система мониторинга лесных пожаров, развернутая в Рослесхозе. Последовательное и правильное применение всех этапов борьбы с лесными пожарами позволяет минимизировать последствия поражающих факторов источников ЧЛС.

На данный момент проблема оценки лесопожарной обстановки на территории субъекта Российской Федерации не решена. Проведено недостаточное количество исследований. Нет общепринятых подходов, эффективных теорий и математических моделей, позволяющих максимально точно спрогнозировать возникновение, динамику и последствия лесных пожаров и ЧЛС. Поэтому, основная задача заключается в создании научной теории, которая позволит оценить процесс и исход чрезвычайной лесопожарной обстановки, снизить риск возникновения пожаров и выбрать правильную стратегию по борьбе с уже возникшей ЧС.

Литература

1. *Подрезов Ю.В.* Методологические основы прогнозирования динамики и последствий чрезвычайных лесопожарных ситуаций.: дис. М.: МГУЛ, 2005.

УДК 502/504

Обеспечение безопасности населения на дорогах, объектах транспортной инфраструктуры и транспортных средствах

И.Б. Линицкий, А.А. Подкопаев, А.А. Хетагуров, В.Э. Буздин

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Распоряжением от 3 декабря 2014 г. № 2446-р, утвержденным Председателем Правительства Российской Федерации, было принято решение утвердить концепцию построения и развития аппаратно-программного комплекса «Безопасный город». Главной целью указанной концепции является повышение общего уровня общественной безопасности, правопорядка и безопасности среды обитания за счет существенного улучшения координации деятельности сил и служб, ответственных за решение этих задач, путем внедрения комплексной информационной системы, обеспечивающей прогнозирование, мониторинг, предупреждение и ликвидацию возможных угроз, а также контроль устранения последствий чрезвычайных ситуаций и правонарушений. Все это говорит об актуальности темы исследований.

Фундаментальной задачей, направленной на реализацию данного комплекса, является формирование коммуникационной платформы, с целью обеспечения информационного обмена между соответствующими федеральными, региональными и муниципальными органами исполнительной власти в области обеспечения безопасности.

Существуют базовые функциональные требования к комплексу «Безопасный город», сгруппированные по следующим блокам:

- безопасность населения и муниципальной (коммунальной) инфраструктуры;
- безопасность на транспорте;
- экологическая безопасность;
- координация работы служб и ведомств и их взаимодействие.

Более подробно хотелось бы рассмотреть блок безопасности на транспорте. Значительное число техногенных катастроф происходит на транспорте. Транспорт является важнейшим связующим звеном нашей страны, звеном современного многоотраслевого хозяйства. Проблемы, связанные с возникновением чрезвычайных ситуаций на автомобильном транспорте, присущи почти всем регионам Российской Федерации. В последние годы резко возросло число личных автомобилей, а также объемы грузоперевозок, и, как следствие, движение стало намного интенсивнее, что, в свою очередь, повышает риск различного рода аварий.

Рассмотрим задачи, необходимые для повышения уровня безопасности в данном направлении:

– обеспечение правопорядка и профилактики правонарушений на дорогах, объектах транспортной инфраструктуры предусматривает видеонаблюдение и видеофиксацию для круглосуточной регистрации фактов различного рода нарушений, а также выявления потенциально опасных событий;

– обеспечение безопасности дорожного движения предусматривает правильное и централизованное управление логистикой общественного и личного транспорта, достоверную геолокацию и фиксацию событий (инцидентов) на дорогах с визуализацией на карте города;

– обеспечение безопасности на транспорте предусматривает экстренную связь на всех объектах транспортной инфраструктуры и транспортных средств, своевременное информирование о чрезвычайных ситуациях, контроль маршрутов общественного

транспорта, мониторинг маршрутов воздушных судов, водных судов и железнодорожного транспорта.

Реализация единого системного подхода к обеспечению общественной безопасности, правопорядка и безопасности среды обитания в условиях сохранения высокого уровня рисков техногенного и природного характера и продолжающейся тенденции к урбанизации является одним из важных элементов создания устойчивого социально-экономического развития и роста инвестиционной привлекательности городов Российской Федерации.

Литература

1. Распоряжение Правительства РФ от 03.12.2014 № 2446-р «Об утверждении Концепции построения и развития аппаратно-программного комплекса «Безопасный город».

УДК 355/359

Взаимодействие Арктических подразделений МЧС с волонтерскими организациями

А.А. Гончаров

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Многие люди начинают осознавать, что природа – это дар, а не данность. В связи с этим, набирают популярность волонтерские организации. Волонтерские организации занимаются различными видами деятельности, связанными с восстановлением окружающей среды. Сейчас для России важную роль играет Арктика и не только, как стратегический запас углеводородов, а как бесценное сокровище природы. Поэтому все силы волонтёрских организаций в России, да и не только в России, направлены на сохранение и очистку окружающей среды в Арктике. Волонтёрская организация Green Arctic, активно принимает в этом участие.

Развитие Арктики является одной из ключевых тем нынешнего времени. Этому свидетельствуют многочисленные строительные объекты, огромные инвестиции и, конечно, появление специальных подразделений МЧС для работы в условиях Арктики. А также многочисленные исследования в Арктической зоне. Стоит упомянуть, что оснащение Арктических подразделений МЧС осуществляется на основе высокотехнологических разработок с применением новых решений. Поиском и реализацией таких решений сейчас активно занимается федеральный центр науки и высоких технологий «Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций» МЧС России.

В работе я расскажу про личный опыт волонтерской работы в Арктике. Акцентирую внимание на тех аспектах, которые можно улучшить. И самое главное, опираясь на опыт предыдущих экспедиций, изложу способы взаимодействия Арктических подразделений МЧС с волонтерскими организациями в Арктике. Постараюсь ответить на вопросы: будет ли эффективно взаимодействие МЧС и волонтерских организаций? Что для этого нужно? Можно ли распространить это взаимодействие в других регионах?

Побывав в волонтерской экспедиции на острове Белом, в составе добровольческой бригады, я сделал для себя вывод о том, что Арктику надо очищать и сохранять её природу. Время шло, а эта мысль терзала меня, и я стал изучать эту тему. И оказалось, что ежегодно в Арктику приезжают более 100 волонтеров. И тут меня осенило, все волонтеры отважные ребята, не знающие страха. Ведь можно использовать эту силу не только для очистки окружающей среды, но и для локализации или ликвидации ЧС! Дело в том, что в Арктике часто происходят ЧС, и бывает такое, что не хватает людей для их ликвидации. Вот тут на помощь могут прийти волонтеры. Конечно, в этом случае, волонтерам требуется специальная подготовка. Эта проблема решается созданием специализированных школ для волонтеров, в которых добровольцы получат необходимую информацию и подготовку.

Создание школ для волонтёров совместно с МЧС

– приведет к уменьшению рисков при работе волонтёрских отрядов в Арктике;

– позволит укрепить взаимосвязь между волонтёрскими организациями и МЧС;

– даст возможность привлекать волонтеров для ликвидации ЧС.

Основные недостатки, организационного процесса работы волонтеров с МЧС на текущий момент:

– отсутствие у волонтеров каких-либо навыков для оказания первой помощи;

– нет четкого разграничения ответственности: не понятно, за что отвечает МЧС, а за что, сами волонтеры во время экспедиции;

Возможности, которые открывает взаимодействие:

– увеличение количества безопасных экспедиций;

– повышение популярности волонтерских организаций;

– более эффективные способы защиты окружающей среды;

– привлечение подготовленных людей к ликвидации ЧС.

В конце работы я подытожил полученную информацию и пришел к выводу о том, что взаимодействие между волонтёрами и МЧС возможно и эффективно, особенно на просторах Арктики. Но для рационального использования волонтерских ресурсов необходимо создавать совместно с волонтерскими организациями обучающие тренинги.

Литература

1. Постановление правительства Российской Федерации от 29 мая 2008 года № 404 «О Министерстве природных ресурсов и экологии Российской Федерации».
2. Постановление правительства Российской Федерации от 4 октября 2011 года № 806 «О Министерстве природных ресурсов и экологии Российской Федерации».
3. *Картамышева Н.С., Биекенова А.С.* Арктика и развитие арктической зоны // Молодой ученый. 2015. № 13. С. 333–337.
4. *Иванченко Д.С., Картамышева Е.С.* Развитие промышленности и технологий в Арктике // Молодой ученый. 2016. № 28. С. 333–336.

УДК 502/504

Оценка устойчивости и сейсмостойкости зданий и сооружений

И.Ю. Яковлева, А.А. Подкопаев, А.А. Хетагуров, В.Э. Буздин, И.Б. Линицкий

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Федеральным законом от 30 декабря 2009 года № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» регламентируются требования к обеспечению безопасности зданий и сооружений в процессе эксплуатации.

1. Безопасность здания или сооружения в процессе эксплуатации должна обеспечиваться посредством технического обслуживания, периодических осмотров и контрольных проверок и (или) мониторинга состояния основания, строительных конструкций и систем инженерно-технического обеспечения, а также посредством текущих ремонтов здания или сооружения.

2. Параметры и другие характеристики строительных конструкций и систем инженерно-технического обеспечения в процессе эксплуатации здания или сооружения должны соответствовать требованиям проектной документации. Указанное соответствие должно поддерживаться посредством технического обслуживания и подтверждаться в ходе периодических осмотров и контрольных проверок и (или) мониторинга состояния основания, строительных конструкций и систем инженерно-технического обеспечения, проводимых в соответствии с законодательством Российской Федерации.

Для комплексной диагностики, обнаружения скрытых дефектов и для определения степени повреждений и устойчивости (сейсмостойкости) зданий и сооружений необходимо применять мобильный диагностический комплекс (лабораторию). С помощью лаборатории могут выполняться

- высокоточная оценка геометрических параметров здания (сооружения) и грунтовой площадки и проверка соответствия обнаруженных геометрических дефектов нормативным параметрам;
- геологические и геофизические исследования грунтового массива площадки. Определение трехмерного строения грунтового массива, физико-механических и динамических параметров. Сейсмозондирование ответственных конструктивных элементов здания для определения их размеров, прочности и наличия скрытых дефектов;
- динамические испытания системы грунт–здание и выявление месторасположения и параметров скрытых дефектов. Анализ динамических параметров и определение степени повреждения и устойчивости здания (сооружения);
- расчеты с применением пакета программ и полученных комплексных параметров по определению возможных предельных нагрузок на здание (сооружение).

Проведение инженерного обследования включает в себя визуальный контроль, геосейсмические, динамические и геодезические измерения, неразрушающий контроль и анализ пространственного и планировочного решения.

Выводы и рекомендации даются на основании проведенного комплексного интегрального анализа всех компонентов, описывающих сооружение. На основе полученных диагностических и расчетных данных об уровне повреждения и риска обрушения определяются инженерные мероприятия, повышающие устойчивость здания (сооружения).

Литература

1. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: федеральный закон от 30 декабря 2009 года № 384-ФЗ. 2009. Гл. 5, ст. 36.
2. *Шахраманьян М.А.*, *Нигметов Г.М.*, *Прошляков М.Ю.* Технология оценки устойчивости и сейсмостойкости зданий и сооружений // Технологии гражданской безопасности. 2004. С. 27–37.

УДК 629.039.58

Разработка автоматизированного комплекса измерения уровня воды для гидротехнических сооружений

В.Д. Маркелова

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
Научно-исследовательский институт энергетических сооружений

В постановлении Правительства РФ от 2 ноября 2013 г. № 986 «О классификации гидротехнических сооружений» гидротехнические сооружения подразделяют на I, II, III и IV классы опасности [1]. В своде правил СП 58.13330.2012, в п. 4.12, прописано, что для сооружений I и II классов [2] следует предусматривать возможность применения автоматизированной системы мониторинга. В связи с продолжительной эксплуатацией и недостаточными объемами проводимых ремонтно-восстановительных работ происходит разрушение основных конструкций сооружений, и создается высокая вероятность чрезвычайных ситуаций. Точные и своевременные данные о фильтрационном режиме сооружения являются залогом безопасной эксплуатации ГТС. Возникает потребность в совершенствовании мониторинга безопасности ГТС, в точности измерений и уменьшении интервала съема показаний, а также исключении человеческого фактора. Для мониторинга уровня воды необходимо применение автоматизированных приборов измерения уровня воды в пьезометрах (используемых для наблюдения за фильтрационным режимом сооружений).

Для автоматизации безнапорных (погружных) пьезометров, расположенных на северном и южных склонах, дамбах верхнего и нижнего бьефов ГАЭС было рассмотрено несколько способов автоматизации: автоматизация с применением погружных датчиков и передачей сигнала по кабельным линиям, проложенными в грунте; автоматизация с

применениям погружных датчиков и передачей сигнала по воздушным линиям с применением опор; автоматизация с применением погружных датчиков и передачей сигнала посредством радиосвязи; автоматизация с применением погружных датчиков и передачей сигнала посредством GSM-связи [3]. Вариант с прокладкой кабельных линий в грунте был затруднителен в реализации в связи с проведением регулярных земляных работ на склонах, а также высокой стоимостью строительно-монтажных работ. Вариант с прокладкой воздушных линий с применением опор так же был отклонен в связи с необходимостью установки значительного количества опор и высокой стоимостью строительно-монтажных работ.

В результате выбора автоматизации с применением погружных датчиков и передачей сигнала посредством радиосвязи, были проведены исследования электромагнитной обстановки работы комплексов, оснащенных радиомодемами с мощностью передатчика 10 МВт, несущей частотой 433 ± 0,2%. Передача информации от пьезометра происходила по эфиру через промежуточную антенну. Для проведения исследования подлежали обследованию три выделенных зоны. В каждом намеченном пункте испытания проводились с целью определения напряженности поля, индустриальных радиопомех в диапазоне частот от 100 МГц до 1 ГГц с определением горизонтальной и вертикальной поляризации по круговому сканированию.

По результатам измерений электромагнитных полей в частотном диапазоне был сделан вывод, что сбои передачи информации от радиомодемов безнапорных пьезометров были выявлены наличием в эфире целого ряда сигналов на частоте 433 ± 0,2% или наличием более мощных сигналов на близких частотах и, как следствие, влиянием гармоник и субгармоник этих сигналов на рабочую частоту модема. С наибольшей вероятностью источниками указанных воздействий в ГТС являются: работа мощного излучающего оборудования систем безопасности, включая систему видеонаблюдения; работа высоковольтного оборудования станции; атмосферные разряды. Изменить режим работы передающих устройств системы безопасности станции не представляется возможным, поэтому ведется работа по разработке и проверке работоспособности схемотехнических решений, позволяющих повысить помехозащищенность радиоканала, а также конструирование новых приемопередающих модулей для размещения в существующих оголовках скважин. На данный момент времени на основе серийно производимых компонентов был собран автоматизированный комплекс измерения уровня жидкости в скважинах и передачи сигнала посредством GSM-связи (рис. 1).

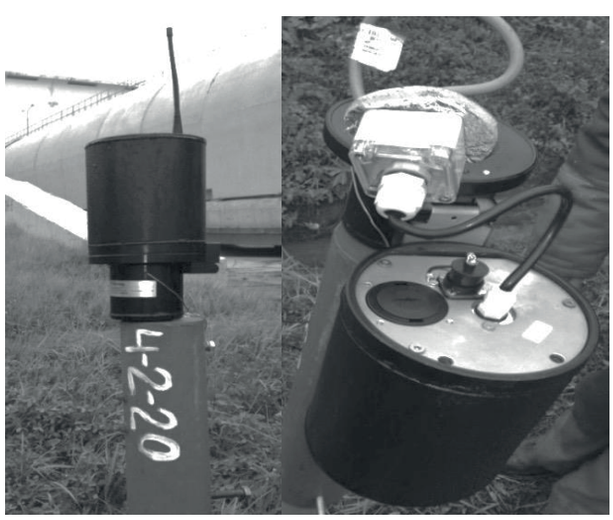


Рис. 1. Фотография пилотного образца автоматизированного комплекса

Работа была поддержана Фондом содействия инновациям (программа «УМНИК», финал программы «УМНИК» – «Технократ» (Роснано) 8604ГУ/2015 №0018912).

Литература

1. Постановление Правительства РФ от 2 ноября 2013 г. № 986 «О классификации гидротехнических сооружений» // http://base.garant.ru
2. Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция. СП 58.13330.2012 // http://docs.cntd.ru/document/120009
3. *Дианов И., Яманов А*. Комплексные решения по GPRS-связи в системах промышленной автоматизации и диспетчеризации // Беспроводные технологии. 2010. № 4. С. 36–40.

УДК 53.082.534

Реализация лидара на основе спектроскопии дисперсии в рамках задачи обнаружения утечек метана

А.Ю. Анненкова, А.Ю. Климчу, А.В. Родин

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Методы дистанционного зондирования, позволяющие удаленно анализировать состояние атмосферы, активно используются в разных задачах и постоянно совершенствуются. Одной из сфер применения методов дистанционного зондирования является обнаружение в магистральных газопроводах утечек, которые влияют на безопасность жизнедеятельности человека, окружающую среду, приводят к пустой трате финансовых средств и потерям транспортируемого газа. Подобные приборы также предлагаются для исследования атмосфер других планет на предстоящих марсианских и венерианских миссиях. К областям применения подобной разработки можно отнести и наблюдение за атмосферой Земли – фиксирование над мегаполисами уровня загрязненности воздуха, состоящего из смеси различных газов. Проблемой контроля утечек определенного газа над конкретной территорией, а именно метана над газопроводами, уже сейчас активно занимаются такие компании, как российская ПЕРГАМ, зарубежные Physical Sciences Inc и Bridger Photonics.

Спектроскопия поглощения является основным методом анализа газового состава атмосферы, применяемым в приборах дистанционного зондирования [1, 2]. Принцип измерения основан на способности исследуемого газа в атмосфере поглощать инфракрасное излучение (ИК) лазера определенной длины волны (метод абсорбционной инфракрасной спектроскопии). Прибор принимает поток излучения, частично отраженный, прошедший через объект контроля, и затем измеряет степень его поглощения, которая впоследствии будет пересчитана в концентрацию газа в зондируемом слое. Наиболее часто в качестве излучателя в подобных приборах используют диодные лазеры, частота которых может перестраиваться, что позволяет измерять спектр поглощения атмосферы в определенном диапазоне частот. Основной проблемой при проектировании подобных систем является малая доля принимаемого излучения. Это создаёт ограничение возможностей приборов при неблагоприятных природных условиях ввиду сильной зависимости от мощности принимаемого излучения и чувствительности к условиям открытой атмосферы [4].

Недостатки данного метода имеют большое значение и побуждают искать другие методы измерений. Решением нашей группы является спектроскопия дисперсии. Основным методом измерений является определение дисперсии среды через фазовую задержку. После чего полученные значения показателей преломления среды пересчитывается по закону Крамерса–Кронига в поглощение исследуемого газа [3]. Метод основан на фазовых измерениях, которые слабо чувствительны к амплитуде сигнала. Нашей группой разработана возможная схема реализации прибора. Определены требования к основным численным характеристикам прибора, таким как масса, габариты, пороговая чувствительность измерений. Найдены критические элементы оптической схемы, один из которых – волоконный усилитель.

Рис.1. Разработка компании ПЕРГАМ «Квадрокоптер с лазерным детектором газа»

Литература

1. *Kosterev A., Wysocki, G.* [*et al*.] Application of quantum cascade lasers to trace gas analysis // Applied Physics. B. 2008. T. 90, № 2. P. 165–176.
2. *Nikodem M., Plant G., Sonnenfroh D., Wysocki G.* Open-path sensor for atmospheric methane based on chirped laser dispersion spectroscopy // Applied Physics B. 2015. T. 119. №. 1. P. 3–9.
3. *Г.И. Шипов.* ОБОБЩЕННЫЕ СООТНОШЕНИЯ КРАМЕРСА–КРОНИГА // Академия Тринитаризма. Эл. № 77–6567. Публ. 13477. 26.06.2006.
4. *Рогаткин Д.А.* Рассеяние электромагнитных волн на случайно-шероховатой поверхности как граничная задача взаимодействия лазерного излучения со светорассеивающими материалами и средами // 2004. Т. 97, №. 3. С. 484–493.

УДК 536.8.355/359.355

Применение парадокса двигателя Стирлинга в Арктике для решения поставленных задач

А.З. Лемутова

Государственное бюджетное общеобразовательное учреждение города Москвы «Школа Глория»

Двигатели – сердце современной цивилизации. Они обеспечивают рост производства, сокращают расстояния. Благодаря им человек получает энергию, свет, тепло, информацию. Наиболее распространенные в настоящее время двигатели внутреннего сгорания имеют существенные недостатки [1].

В ходе исследования был доказан парадокс двигателя Стирлинга. Производители двигателя Стирлинга заявляют, что двигатель работает от перепада температур, но не так давно стало известно, что есть зависимость от того, в какую сторону происходит перепад температур: от изначальной температуры до более низкой или от изначальной температуры до более высокой. В ходе эксперимента, в котором рассматривалось два этих случая, было выявлено, что у γ-Стирлинга в первом случае было гораздо большее количество оборотов, чем в предыдущем, то есть КПД в этом случае выше. Данный факт обуславливает границы применимости тепловых двигателей в целом и двигателя Стирлинга в частности.

Изученный парадокс помог найти еще одно его применение. Например, тепловой двигатель будет особенно эффективен на полюсах, в ледниках, в горах и регионах, где температура окружающей среды будет постоянно ниже 250 К. В природных условиях Арктики этот двигатель можно применить для обогрева жилья.

Для предложенного выше применения следует использовать β- и γ- Стирлинги.

После доказательства изучения парадокса двигателя Стирлинга были выявлены явные преимущества двигателя Стирлинга перед двигателем внутреннего сгорания:

– двигатель внутреннего сгорания имеет максимальный коэффициент полезного действия равный 25%. При дальнейших разработках двигателя Стирлинга этот показатель может быть приближен к циклу Карно;

– нефтяная эра подходит к концу. Это говорит о том, что двигателям внутреннего сгорания, которые преобразуют тепловую энергию от сгорания топлива в механическую работу, нужна будет замена на новый двигатель, рабочее тело которого дармовое, то есть, двигатель Стирлинга сможет успешно справиться с этой задачей;

При дальнейшем изучении возможностей двигателя Стирлинга и его парадокса человечество совершит множество инновационных открытий и найдет ему применение в различных ситуациях.

Литература

1. *Ридер Г., Хупер Ч.* Двигатели Стирлинга/ пер. с англ. М.: Мир, 1986. 464 с., ил.

УДК 51-77

Поиск парадоксов Браесса в транспортных и физических задачах

А.Д. Лобанов

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Развитие транспортной инфраструктуры в век высоких технологий происходит не по дням, а по часам. Увеличивается количество автомобилей как на душу населения, так и в абсолютном значении, прокладывается все больше и больше новых дорог к населенным пунктам, для разгрузки транспортных путей возводятся новые развязки. Учитывая данные факты, нельзя проигнорировать вопросы уместности и рациональности той или иной модернизации. Так как же определить, где нужно поставить светофор, где проложить туннель, а где поставить пешеходный переход, каким образом провести дороги к новому микрорайону и улучшить транспортную доступность старого? Понятно, что необходимо удовлетворить потребности всех участников движения. Задачи планирования и проектирования, которые отвечают на данные вопросы, предваряются разработкой и решением модельных задач, в связи с большими временными и материальными затратами при реализации каких-либо изменений в реальности.

Одна из основных задач, возникающих при макроскопическом моделировании – расчёт времени движения автотранспортного средства в пути

В 1952 году английский ученый Дж.Г. Вардроп представил миру свои два принципа равновесия, которые относятся к концепции равновесия Нэша из теории игр, которые были разработаны независимо друг от друга. Первый принцип во многом схож с идеями 1920-х годов, которые были высказаны в соавторстве с Ф.Найтом. Его формулировка: «Время на поездку на всех используемых к данному моменту путях всегда будет не больше, чем время на поездку по путям неиспользуемым; каждый из участников потока независимо от остальных в каждый момент времени пытается выбрать наиболее оптимальную траекторию движения». Если продолжать сравнение физических аналогий, то модель движения транспортных потоков достаточно точно описывается моделью распространения вязкой жидкости. Второй принцип заключается в том, что среднее время поездки достигается только при совместных усилиях всех участников потока.

В 1956 году Бекман (Beckmann), Макгуайр (McGuire) и Уинстен (Winsten) впервые построили математическую модель сетевого равновесия, в которой оптимум является равновесием Нэша–Вардропа.

В шестидесятых годах Дитрих Браесс столкнулся с парадоксом, который впоследствии был назван «*парадокс Браесса*».

Опишем парадокс Браесса на реальном примере, который был обнаружен в г. Владивостоке (РФ) [1]. На рёбрах транспортного графа укажем зависимость времени в пути от количества АТС на данном пути. Проще говоря, можно описать ситуацию следующим образом: Изначальная позиция: аэропорт и город соединены двумя путями, один из которых проходит через мыс Черепахи, а второй через город Артем. Обе дороги находятся в неудовлетворительном состоянии и не имеют достаточной пропускной способности. В связи с этим, даже исходя из простых геометрических соображений, загруженность каждого пути будет приблизительно равной. Затем на мысе Черепахи построили большую игровую зону и провели туда шоссе. Проходимость дороги сразу увеличилась, но это не сильно повлияло на распределение транспортных потоков, как и при дальнейшем построении шоссе Артем–Владивосток. Парадокс возник при построении шоссе Артем–Геймланд. Однако при появлении в сети новой дороги, равновесное время в пути резко увеличилось. Это связано с тем, что равновесие Нэша–Вардропа на данной сети достигается в ситуации, когда достаточное количество автомобилей едет по маршруту Аэропорт–Артем–Геймланд–Владивосток. Механизм образования парадокса Браесса во многом перекликается с дилеммой заключенного из теории игр: каждый выбирает оптимальную для себя стратегию, этим самым только ухудшая оптимальное равновесие.

Этот же парадокс был найден в Нью-Йорке при закрытии 42-й улицы в 1990 году в Штутгарде; когда закрыли свежепостроенную дорогу, для открытия реки Чонгечон убрали магистраль и это привело к улучшению трафика в Сеуле [3].

Парадокс Браесса проявляется не только в трафике. Недавно ученые доказали его существование и в мезоскопической физике. Ученые сделали прямоугольную модель электронной сети. Она соединяется со стоком и истоком довольно большими каналами, а остальные два канала сделали узкими. Затем в центре открыли третий канал. Как оказалось, новый канал не улучшает, а даже ухудшает ситуацию, и чем шире этот средний канал, тем больше падает напряжение. Таким образом существует еще и «*квантовый парадокс Браесса*».

Еще одно исследование провели уже в Англии. При подведении энергии от ветряных и солнечных электростанций, чтобы населенный пункт получал достаточное количество энергии без перебоев, лучше использовать децентрализованную сеть. Другими словами, подводить к населенному пункту не одну, а, например, две линии ЛЭП. Это оказалось очень полезным, ведь бывает так, что в одном месте есть ветер, а в другом совершенное затишье, а также в случае какой-либо поломки на одном из генераторов. Парадокс Браесса для электрических сетей заключается в том, что построение очередной ЛЭП, как и в траффике, может ухудшить общую ситуацию [2].

Как показали Роугарден и Вэлиант в 2006 году, данный парадокс встречается с большой вероятностью в случайных графах, то есть в случайно построенных транспортных сетях. Может показаться, что проблема надуманна, и достаточно найти неэффективные ребра в имеющейся сети и правильно строить дороги в дальнейшем. Однако все сложнее. Ранее (в 2001 году) Роугарден показал, что даже при достаточно общих предположениях о свойствах транспортной сети, которые обычно закладываются в реальные модели городов, поиск неэффективных ребер является NP-сложной задачей, то есть фактически не решаемой. С другой стороны, как показал Мильтах, единственная сеть, в которой не может реализоваться парадокс Браесса – это сеть параллельных дорог. Все это говорит о том, что непродуманное увеличение числа дорог может не только не улучшить ситуацию, но даже ухудшить её.

Автор разработал программу, позволяющую искать парадоксы Браесса на различных потоках на нескольких частных случаях транспортных сетей.

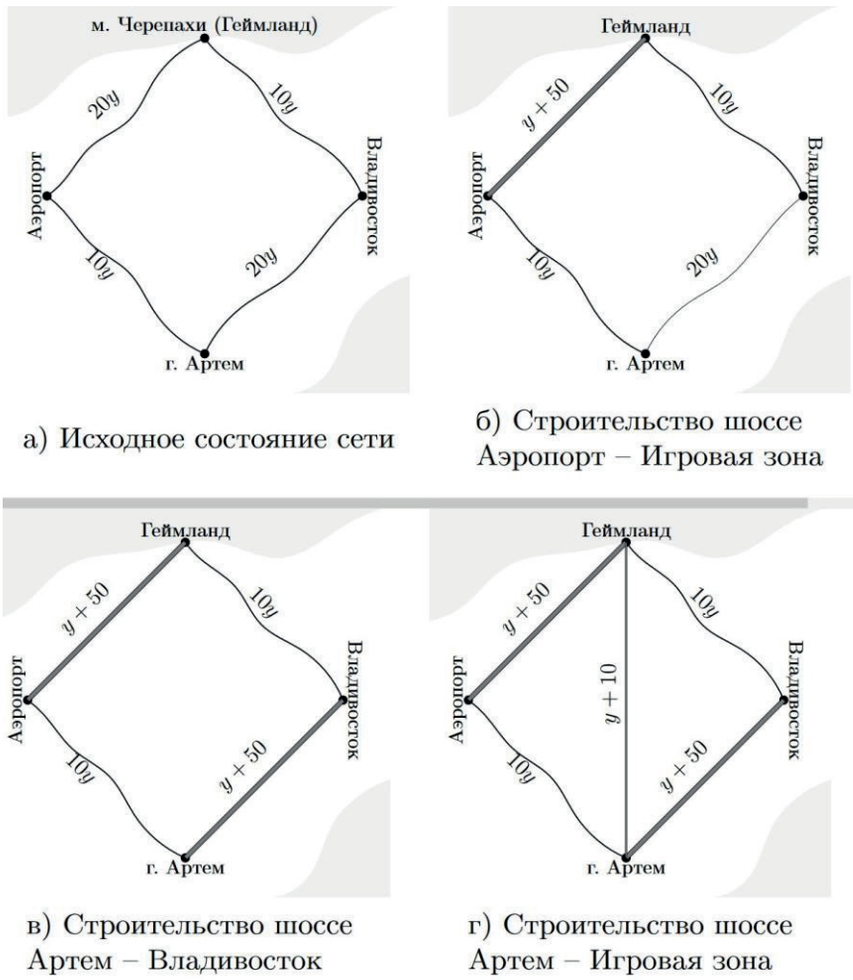


Рис. 1. Схематичная визуализация парадокса во Владивостоке

Литература

1. *Гасников А.В.* и др. Введение в математическое моделирование транспортных потоков, МЦНМО, М., 2013.
2. Witthaut D., Timme M. Braess's paradox in oscillator networks, desynchronization and power outage //New Journal of Physics. 2012. Т. 14. №. 8. С. 083036.
3. *Hayes B*. Playing in Traffic //AMERICAN SCIENTIST. 2015. Т. 103. №. 4. С. 260–263.

УДК 629.4.023.142

Оценка безопасности пассажирских вагонов при аварийном опрокидывании на бок

О.И. Бондаренко, Д.А. Бондаренко, Д.Я. Антипин

Брянский государственный технический университет

Анализ последствий аварийных ситуаций, произошедших мире за последние 50 лет и связанных с крушением пассажирских поездов, показал, что одними из наиболее опасных для здоровья и жизни пассажиров являются аварии с падением вагонов на откос насыпи железнодорожного полотна. Наиболее тяжелые последствия наступают в случае возникновения значительных пластических деформаций или разрушения несущей конструкции кузова вагона. При этом в момент аварии пассажиры получают тяжелые

травмы вследствие значительного изменения геометрии пассажирского салона и ударных взаимодействий с деформированными и разрушенными элементами металлоконструкции кузова. Вторым фактором, влияющим на тяжесть последствий подобных аварийных ситуаций, является сложность эвакуации пассажиров (в том числе получивших травмы) из кузовов вагонов. Это связано со значительными изменениями геометрии несущей конструкции и положением вагона «на боковой стене».

Для снижения вероятности травмирования пассажиров в подобных аварийных ситуациях при проектировании несущих конструкций кузова должен формироваться объем пассажирского салона, достаточный для безопасного нахождения в нем пассажиров и исключающий перемещение элементов металлоконструкции кузова при авариных внешних воздействиях на вагон. Данный объем традиционно называется «зоной безопасности».

Обеспечение «зоны безопасности» в конструкциях отечественного пассажирского подвижного состава регламентируется нормативным документом [1] путем установления минимального момента сопротивления подкрепляющих элементов боковых стен и крыши кузова вагона. Указанные требования разработаны в 80-х годах прошлого столетия и в настоящее время не в полной мере учитывают современные требования, предъявляемые к перспективным конструкциям кузовов пассажирского подвижного состава (масса металлоконструкции, применению алюминиевых и композитных панелей, перфорированным профилям подкрепляющего набора и т.д.). В связи с этим актуальной становится задача разработки методики, позволяющей оценивать на стадии проектировании параметры безопасности пассажирского подвижного состава при аварийном опрокидывании его на бок.

Изучение мирового опыта в области обеспечения безопасности современного пассажирского подвижного состава, включая высокоскоростной, показало, что основным методом прогнозирования сценария развития аварийных ситуаций, связанных с падением вагонов на железнодорожную насыпь, является математическое компьютерное моделирование [2,3]. Результаты моделирования подвергаются обязательной верификации данными, полученными при натурных экспериментах или анализе последствий железнодорожных аварий, сходных с исследуемой по сценарию развития. Основным инструментом для проведения подобных теоретических исследований являются программные комплексы, реализующие метод конечных элементов и позволяющие описывать быстротекущие высоконелинейные процессы деформирования упругопластических сред.

По результатам проведенного анализа в работе предложена методика прогнозирования нелинейного деформирования несущих конструкций кузовов пассажирских вагонов при их опрокидывании на откос железнодорожной насыпи.

На первом этапе методики производится исследование кинематики вагона при его опрокидывании, в результате которого определяются зоны взаимодействия кузова вагона с откосом насыпи, а также скорость и ускорения элементов несущей конструкции кузова в момент взаимодействия.

На втором этапе методики формируется детализированная пластинчатая упругопластическая динамическая модель несущей конструкции кузова, на основе которой разрабатывается модель взаимодействия кузова с железнодорожной насыпью. В модели насыпь представляется пластиной, обладающей упруго-диссипативными характеристиками, соответствующими характеристикам насыпи из щебня фракции 25-40 ГОСТ 7392-2002.

При описании деформирования несущей конструкции кузова использовались изотропные пластинчатые элементы из упругопластичного материала, пластические свойства которого описывались на основе упрощенной модели пластичности Джонсона–Кука [4]. При моделировании применялось явное интегрирование на основе метода центральных разностей с сохранением ускорений постоянными в пределах шага и квадратичной аппроксимацией вектора перемещений для трех последовательных моментов времени.

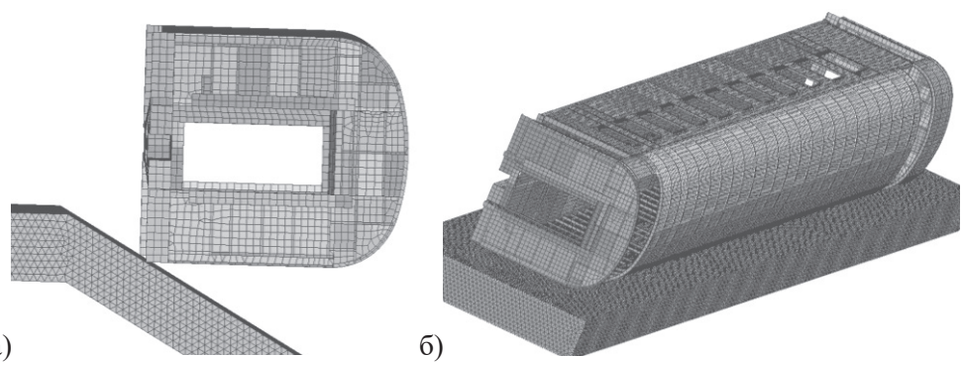
В качестве начальных условий для моделирования были приняты кинематические условия, полученные на первом этапе методики.

В качестве объекта исследований в работе был рассмотрен кузова отечественного пассажирского некупейного вагона модели 61-4447 производства ОАО «Тверской вагоностроительный завод».

По результатам моделирования были получены картины изменения напряженно-деформированного состояния несущей конструкции кузова в процессе его падения на железнодорожную насыпь.

Анализ результатов показал, что в процессе взаимодействия несущей конструкции кузова с насыпью можно выделить два момента, характеризующихся экстремумами изменения картины деформированного состояния: момент первого взаимодействия кузова с откосом насыпи (рис. 1 а) и момент соприкосновения всей плоскости боковой стены кузова с откосом насыпи (рис. 1 б).

Для первого момента наибольшие пластические деформации возникают в элементе нижней обвязки боковой стены и консольных частях поперечных балок рамы, а также в подкрепляющих элементах крыши вагона в зонах установки кондиционера и бака с водой. Во второй момент к возникшим ранее пластическим деформациям добавляются деформации обшивки и подкрепляющих элементов стены и дуг крыши. При этом величины максимальных деформаций для всех моментов сценария падения вагона не приводят к нарушению «зоны безопасности кузова». Сопоставление полученных картин деформации кузова с картинами, полученными при натурных падениях кузовов вагонов на откос насыпи, указывают на качественное их совпадение, что может свидетельствовать об адекватности получаемых результатов. Таким образом, предложенная методика может быть использована для оценки безопасности пассажирских вагонов при аварийном опрокидывании на откос насыпи железнодорожного пути.



а) б)

Рис. 1. Конечно-элементная схема опрокидывания пассажирского вагона на земляное полотно: а) начальный момент взаимодействия кузова с земляным полотном; б) конечный момент опрокидывания

Литература

1. Нормы для расчета и проектирования новых и модернизируемых вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). М.: ВНИИВ-ВНИИЖТ, 1983.
2. Jindong Yang Derailment and crash simulation of waterfall train accident / Jindong Yang, Nick Foster. FEA Information, 2004. 412p.
3. *Полушко О.И.* Анализ ударопрочных конструкций подвижного состава и их применение на железнодорожном транспорте // Новые горизонты: Материалы IV Международной конференции-конкурса. Брянск: БГТУ, 2017. С. 82–84.
4. *Соболев, А.В.,* [*и др.*] Использование модели пластичности Джонсона-Кука в численном моделировании бросковых испытаний контейнеров для транспортирования ОЯТ// Известия вузов. Ядерная энергетика, 2016. № 3. С. 82–93.

УДК 608.2

Перспективные методы раннего обнаружения очагов лесных пожаров

Д.И. Абубакиров, Е.С. Крупник

Московский физико-технический институт (государственный университет)

В последнее время участились случаи крупных лесных пожаров. Это наносит огромный вред окружающей среде, не говоря уже об опасности для ближайших населенных пунктов. Раннее обнаружение очагов возгорания поможет ликвидировать пожары на начальной стадии и предотвратить множество катастроф. Целью данной работы являлся анализ возможности разработки, создания и технического сопровождения глобальной системы обнаружения лесных пожаров на ранней стадии.

В рамках исследования был проведен анализ различных систем детектирования.

4. Покрытие наблюдаемой площади устройствами на стационарных аэростатах, связанных в единую MESH-сеть [1] или оборудованных LPWAN [2] передатчиками. Оборудование включает в себя специализированный инфракрасный датчик и вычислительный блок.
   a. Преимущества:
      i. низкая себестоимость;
      ii. не требует обслуживания.
   b. Недостатки:
      i. несовершенство оборудования требует доработки.
5. Мониторинг наблюдаемой площади с использованием беспилотников (дронов), оборудованных камерами. При анализе видео потока возможно применять машинное обучение. Следует отметить, что дроны в эксплуатации существенно дешевле вертолетов.
   a. Преимущества:
      i. возможность расширения функционала;
      ii. может избавить от необходимости использовать вертолетную технику для разведки.
   b. Недостатки:
      i. необходимость обслуживания.
6. Распространение датчиков температуры и дыма по наблюдаемой площади на приземном уровне.
   a. Преимущества:
      i. обнаружение пожара на самых ранних стадиях;
      ii. крайне высокая долговечность.
   b. Недостатки:
      i. для качественного покрытия необходимо большое количество датчиков.

Всесторонние научные исследования в области технического оснащения вверенных сил необходимыми средствами, необходимыми для предупреждения, предотвращения и ликвидации последствий ЧС проводились ранее и ведутся сегодня в Федеральном центре науки и высоких технологий “Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций” МЧС России. [3]

В данной работе были промоделированы три системы раннего обнаружения лесных пожаров. Наиболее эффективные результаты показала система на аэростатах, однако необходимо провести полномасштабные испытания для получения более точных результатов.

Помимо того, что описанная система сэкономит до 900 млн рублей в год (~15% от текущих затрат), она сохранит огромные запасы леса, защитит природу и снизит количество жертв лесных пожаров и их последствий.

Литература

1. *Akyildiz* F., *Wang Xudong, Wang Weilin*, Wireless mesh networks: a survey // Computer Networks// 15 March 2005. V. 47, I. 4, P. 445-487.
2. *Кумаритова Д. Л., Киричек Р. В.* Обзор и сравнительный анализ технологий LPWAN сетей // Информационные технологии и телекоммуникации. 2016. Т. 4, № 4. С. 33–48.
3. Постановления правительства Российской Федерации от 30 декабря 2003 г. № 794 «О единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций».

УДК 621.454.4

Модель механического разрушения коксового слоя потоком газа

М.Д. Иванов, И.В. Лаптев

Московский физико-технический институт (государственный университет)
Исследовательский центр им. М.В. Келдыша

В камере некоторых ракетных двигателей на твёрдом топливе для защиты корпуса от перегрева используется резиновое теплозащитное покрытие (ТЗП) [1, 2]. В процессе нагрева на покрытии образуется коксовый слой, который значительно изолирует материал стенки от воздействия потока продуктов сгорания. При превышении потоком некоторой критической скорости коксовый слой механически уносится. При этом значительно ускоряется разрушение ТЗП. Таким образом, возникает необходимость предсказывать критическую скорость, а также скорость уноса коксового слоя при превышении этой скорости.

Коксовый слой является пористым и хрупким. Поток продуктов сгорания, который течёт над коксом, влияет на него через вязкое трение. Сила, с которой поток воздействует на ТЗП, пропорциональна квадрату скорости. При этом прочность коксового материала ограничена. А следовательно, при достижении некоторой пороговой скорости он разрушается и уносится вместе с потоком.

Для описания механического уноса коксового слоя с теплозащитного покрытия была разработана модель и на её основе формулы для пороговой скорости потока и скорости уноса.

В основу модели легли предположения:

- коксовый слой можно заменить конструкцией из кубических элементов (рис. 1 и рис. 2);
- бесконечно тонкая плоскость, которая скрепляет между собой слои кубических элементов, исчезает, когда слой над ней уносится;
- кубические элементы состоят из сплошного твёрдого материала;
- каждый кубический элемент имеет размеры $a \times a \times a$ и помещён в ячейку размером (соотношение между a и b определяется значением пористости кокса);
- считается, что на верхнюю грань кубического элемента действует такая же по величине сила сопротивления, как на верхнюю грань ячейки;
- для кубического элемента работает такая же формула максимального напряжения на разрыв при изгибе, как для балки;
- когда слой кубических элементов сорван, предполагается, что поток газа не может воздействовать с достаточной силой на следующий слой, пока не разгонит сорванный слой до пороговой скорости (скорость потока, при достижении которой коксовый слой начинает уноситься).

Исходя из этих предположений, были получены формулы, которые связывают прочность коксового слоя и скорость уноса с параметрами потока. Формула для пороговой скорости потока:

$$v_{lim} = \sqrt{\frac{\sigma_t}{3\rho_{flow} c_f^s}},$$

где σ_t – напряжение на разрыв для коксового материала, ρ_{flow} – плотность потока газа, c_f^s – коэффициент сопротивления поверхности кокса.

Формула для скорости уноса:

$$v_{\text{destr}} = \frac{v_{\text{flow}}(v_{\text{flow}} - v_{\text{lim}})}{v_{\text{lim}}} \frac{\rho_{\text{flow}} c_f^c (1 - \Pi)}{2\rho_{\text{coke}}},$$

где v_{flow} – скорость потока в данный момент, c_f^c – коэффициент сопротивления для кубического элемента, П – пористость коксового материала, ρ_{coke} – плотность коксового материала.

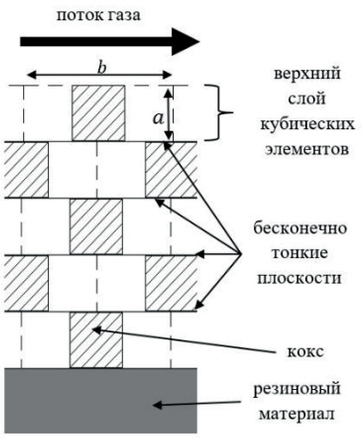


Рис. 5. Модель коксового слоя (вид сбоку)

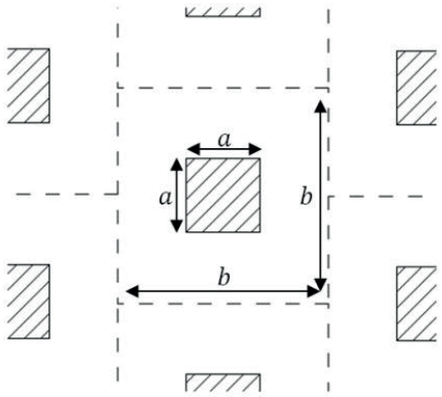


Рис. 6. Модель коксового слоя (вид сверху)

Литература

1. *Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б.* Тепловая защита. М.: «Энергия», 1976. 392 с.
2. *Панкратов Б.М., Полежаев Ю.В., Рудько А.К.* Взаимодействие материалов с газовыми потоками. М.: «Машиностроение», 1975. 224 с.

УДК 533.17

Методика поэтапного численного моделирования распространения струи из сопла

К.А. Вишневский

Исследовательский центр им. М.В. Келдыша

В связи с интенсивным развитием вычислительной техники в настоящее время имеется возможность заменить натурное и масштабное моделирование процессов численным. Благодаря появлению коммерческих продуктов, так или иначе связанных с пакетами автоматического проектирования, такой способ получает все большее распространение в инженерной практике. Особенно актуален данный метод при решении трехмерных задач газовой динамики.

Задача, рассматриваемая в данной работе, связана с исследованием распространения струи из сопла вертикального торможения (ВТ) – ключевого элемента посадочной твердотопливной двигательной установки (ПТДУ) возвращаемого аппарата перспективной пилотируемой транспортной системы (ВА ППТС), а также взаимодействия данной струи с посадочной поверхностью (ПП). Ввиду конструктивных особенностей ПТДУ и ВА в целом, сопло ВТ имеет нестандартную конструкцию: сложные соединительные тракты подводящей системы, косой срез сопла и прямоугольное критическое сечение, параметры которого регулируются посредством поворотной рамки.

Таким образом, задача является сугубо трёхмерной и не может быть сведена к решению задач об истечении струй из сопел стандартных конфигураций. Непосредственное её решение с достаточной точностью в любом из пакетов программ CFD также затруднено в связи с масштабами задачи.

Ввиду сложности, геометрию модели предлагается выполнить в SolidWorks, а численное моделирование распространения струи и взаимодействия её с ПП, во избежание

возникновения проблем с совместимостью, проводить с помощью программы FlowSimulation, встроенной непосредственно в SolidWorks.

Для решения проблемы, связанной с большими масштабами задачи, предлагается ввести твердотельную расчетную область, разделенную на N подобластей, и решать последовательно задачу в каждой подобласти как внутреннюю. Последнее становится возможным благодаря использованию инструмента «*Перенесенные граничные условия*», предлагаемого разработчиками FlowSimulation. Инструмент при соблюдении определенных условий позволяет использовать результаты расчета из подобласти k в качестве граничных условий для подобласти $k + 1$. Таким образом, формально возможно проведение поэтапных расчетов практически любой требуемой точности.

В работе рассматриваются условия, позволяющие применить предложенную методику, а также полученные посредством данной методики результаты численного моделирования распространения струи воздуха высокого давления и продуктов сгорания воздушно-этаноловой смеси из модели сопла ВТ и взаимодействия этой струи с моделью ПП. Данная геометрия модели также будет использована для исследования поставленной задачи на сопловом дифференциальном стенде ГНЦ ФГУП «Исследовательский центр им. М.В. Келдыша». Последнее в дальнейшем позволит также провести сравнение численных расчетов с экспериментом.

Литература

1. *Абрамович Г.Н.* Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1991. 600 с.
2. *Алямовский А.А., Собачкин А.А., Одинцов Е.В., Харитонович А.И., Пономарев Н.Б.* Solid Works 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. 1040 с.: ил.

УДК 536.244

Расчетная модель поверхностного разрушения углеродных композиционных материалов

Д.Ю. Прасолов

Московский физико-технический институт (государственный университет)

В большинстве теоретических работ УУКМ не рассматривается как совокупность материалов с различными термохимическими свойствами. Обычно принимается, что углеграфитовый материал содержит в себе до 100% углерода, который может вступать в химические реакции с такими газовыми компонентами, как O_2, H_2O, CO_2, и скорости этих реакций описываются законом Аррениуса. Во многом такой подход справедлив в тех случаях, когда речь идет о графитах, являющихся пусть и поликристаллическими, но достаточно однородными с малой анизотропией свойств.

В случае УКМ такой подход не совсем верен, поскольку на масштабе структурного элемента одновременно могут присутствовать самые разнообразные формы углерода, имеющие реакционные способности, отличающиеся в кратности и даже на порядок.

Различие в скорости уноса массы отдельных элементов УКМ будет приводить к формированию неровностей или шероховатости поверхности, масштабы которой должны быть сопоставимы с масштабом структурных элементов, что подтверждается многочисленными экспериментальными данными [1].

Шероховатость поверхности, в свою очередь, приводит к интенсификации теплообмена и, следовательно, росту скорости уноса массы УУКМ.

В данной работе проводилось численное моделирование взаимодействия высокотемпературного потока продуктов сгорания РДТТ и неоднородной поверхности УУКМ, состоящей из углеволокна в качестве каркаса и пироуглерода в качестве матрицы. Моделирование было произведено на языке программирования Java. В качестве основной была принята «Модель Бояринцева–Звягина» [2].

Физическая модель наглядно продемонстрирована на рис. 1. Продукты сгорания РДТТ диффундируют через пограничный слой к поверхности РДТТ, где реагируют с материалом стенки. Продукты реакции, в свою очередь, диффундируют в обратную сторону. Изменение температуры материала моделируется при помощи численного решения уравнения теплопроводности.

Предложенная модель обладает значительным числом недостатков и упущений, что позволяет говорить о ней лишь как о приближенной расчетной модели. Производится работа по созданию новой модели уноса массы УУКМ, в которой сохраняется большинство основных принципов, а некоторые подвержены значительному пересмотру:

$$j_{i;j;react} = M_c * k_{0i} * \exp(\frac{-E_{i;act}}{RT_{wall}}) * \frac{p_{wall}}{RT_{wall}} * \frac{C_{j;non-\dim;wall}}{M_j}, \quad (1)$$

$$j_{diff;wall-ext;i} = -q_{wall} \frac{C_{non-\dim;ext;i} - C_{non-\dim;wall;i}}{h_{ext} - h_{wall}}, \quad (2)$$

$$f(k) = \frac{(\alpha / c_p)_R}{(\alpha / c_p)_0}\Big|_{\mathrm{Re}_x=const} \approx [0{,}4 + 0{,}444\eta_s^{0,222}]^{0,8}, \quad (3)$$

$$\eta_s = \frac{\rho u k_s}{\mu}\sqrt{c_f}. \quad (4)$$

В качестве расчетного метода был использован явно-неявный метод.

Необходимо определить зависимость интенсивности теплообмена между потоком и поверхностью УУКМ и скорость уноса массы материала.

Построена приближенная модель уноса массы УУКМ с учетом различия термохимических свойств каркаса и матрицы и влияния шероховатости на интенсификацию теплообмена.

Выполненные расчетные оценки показали, что проявление шероховатости поверхности УУКМ может приводить с течением времени к интенсификации теплообмена на 60–100%, при этом массовая скорость уноса каркаса материала изменяется в существенно меньшей степени и составляет 20–40%.

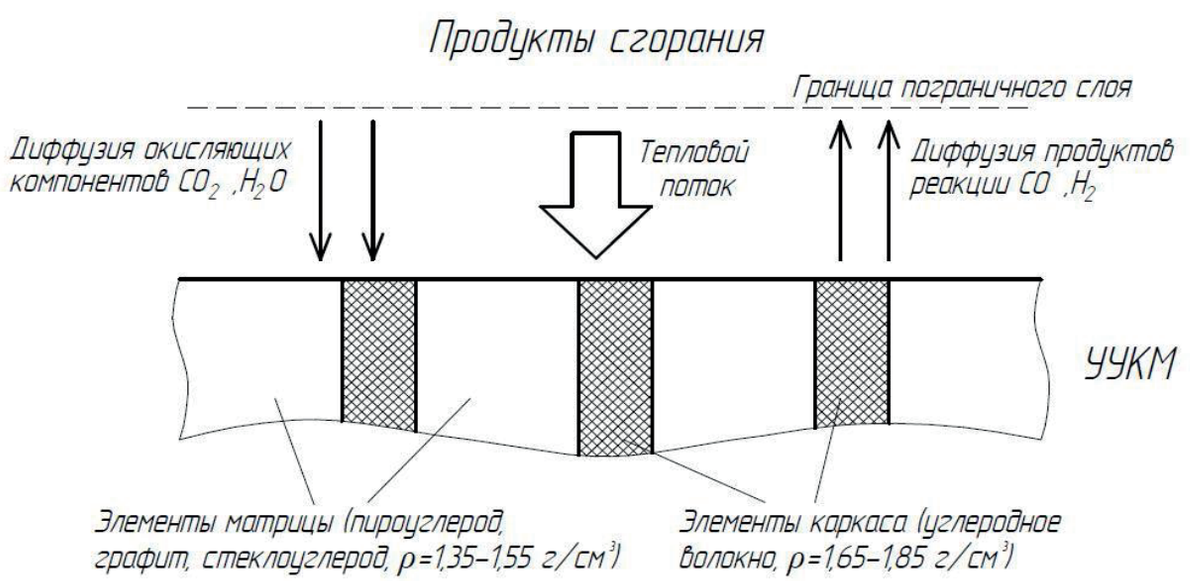


Рис. 1. Физическая модель процесса

Литература

1. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. М.: «Наука», 1974.
2. *Бояринцев В.И., Звягин Ю.В.* Исследование разрушения углеграфитовых материалов при высоких температурах // Теплофизика высоких температур. 1975 Т. 13, № 5. С. 1045–1051.

УДК 629.78:621.039

Зондовые измерения концентрации электронов в электронно-лучевой плазме

А.А. Шомин

Исследовательский центр им. М.В. Келдыша
Московский физико-технический институт (государственный университет)

Актуальность данной темы обусловлена необходимостью создания зондов и теории по их расчету для исследования электронно-лучевой плазмы низкой энергии.

В последние годы все большее применение находят генераторы пучков электронов, основанные на эффекте убегания электронов из высоковольтного тлеющего разряда. Несомненным достоинством таких генераторов является способность функционировать непосредственно в той газовой среде, в которой необходимо получение пучка электронов, что позволяет осуществлять различные технологические процессы без использования громоздких узлов вывода пучка из вакуумного ускорителя.

В данной работе рассматривается метод измерения концентрации электронов с помощью вольт-амперной характеристики, снятой с двойного зонда Ленгмюра.

В процессе измерения тока на зонд возникают сложности, обусловленные конструкцией генератора и зонда. Ток на зонд определяется не только частицами из плазмы, но и электронами, попадающими на приемник напрямую с катода генератора, что существенно искажает измеряемые параметры.

Литература

1. *Хаддлстоун Р., Леонард С.* Диагностика плазмы. М.: Мир, 1967. 515 с.
2. *Чан П., Тэлбот Л., Турян К.* Электрические зонды в неподвижной и движущейся плазме. М.: Мир, 1978. 201 с.
3. *Головин А.И.* Исследование вольт-амперных характеристик генераторов электронных пучков с высоковольтным тлеющим разрядом // http://elibrary.ru 2016. с. 4.

УДК 662.612.325

Расчет процессов горения в ракетных двигателях твёрдого топлива

Ю.Э. Мелкова

Московский физико-технический институт (государственный университет)
Исследовательский центр им. М.В. Келдыша

В работе рассматриваются процессы, проходящие в камере сгорания ракетного двигателя твёрдого топлива на стадиях догорания заряда. Расчеты проводятся с учётом деструкции открывающейся при догорании заряда теплозащитной поверхности.

Моделирование осуществляется численным решением системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{dM_{ch}}{dt} = S_{ch}(e)\rho_f \alpha p^{\nu} - c_{ch}\eta \dfrac{pF_{cr}}{\beta_{\Sigma}(c_з)}, \\ \dfrac{dM_{hss}}{dt} = \rho_{hss}(1-k)\dfrac{\xi}{2}\displaystyle\int_{S^{hss}(0)}^{S^{hss}(e)} \frac{dS}{\sqrt{t - t_{open}(S)}} - (1-c_{ch})\eta \frac{pF_{cr}}{\beta_{\Sigma}(c_{ch})}, \\ \dfrac{de}{dt} = \alpha p^{\nu}, \end{cases}$$

где M_{ch} и M_{hss} – соответственно массы заряда и теплозащитной поверхности внутри камеры сгорания, ρ_f и ρ_{hss} – плотности топлива и теплозащитной поверхности соответственно, S_{ch} и S_{hss} – площади поверхностей горения заряда и теплозащитной поверхности соответственно, F_{cr} – площадь критического сечения сопла, p – давление в камере сгорания, e – толщина сгоревшего слоя, k – коксовое число ТЗП, t – текущее время, t_{open} - время открытия элемента площади ТЗП, c_{ch} - концентрация продуктов сгорания заряда в камере сгорания.

Расчеты осуществляются для разных параметров топлива и характеристик двигателя. Решение данной системы позволяет оценить поток истекающего из сопла газа, и в определённом приближении определить время работы и удельный импульс двигателя на конечных стадиях горения заряда.

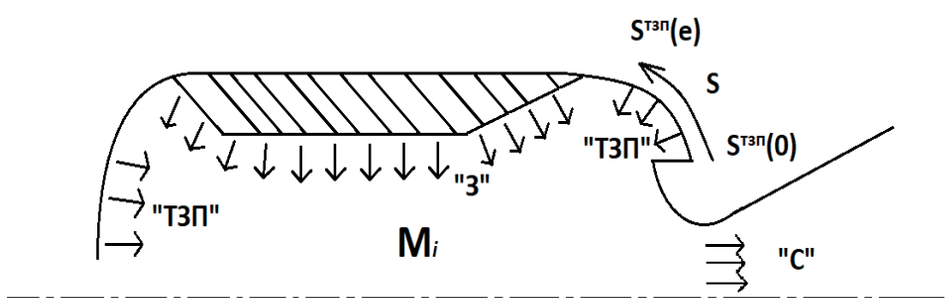


Рис. 1. Схема поступления в камеру сгорания продуктов горения топлива и ТЗП

Литература

1. *Алемасов В.Е., Дрегалин А.Ф., Тришин А.П.* Теория ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1980. 533 с.
2. Газодинамические и теплофизические процессы в ракетных двигателях твердого топлива / под ред. А.С. Коротеева. М.: Машиностроение, 2004. 513 с.
3. *Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б.* Тепловая защита / под ред. А.В. Лыкова. М.: Энергия, 1976. 407 с.

УДК 665.725

Применение СПГ в качестве ракетного топлива

А.Д. Кондратенко

Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина

В настоящее время практически во всех передовых странах разрабатываются двигатели, в которых в качестве горючего будет использоваться метан. Применение сжиженного природного газа (СПГ) в качестве ракетного топлива обладает целым рядом

преимуществ. Метан не токсичный, дешевый, доступный, менее взрывоопасен по сравнению с применяемыми сегодня ракетными топливами.

Однако стоит вопрос о производстве качественного СПГ для таких двигателей. Показатели качества СПГ должны соответствовать требованиям ГОСТ Р 56021-2014 «Газ горючий природный сжиженный. Топливо для двигателей внутреннего сгорания и энергетических установок. Технические условия» для СПГ марки А.

Кроме того, получение СПГ для всех видов транспорта целесообразно только на малотоннажных установках, а к сырьевому газу необходимо предъявлять следующие требования:

– содержание CO_2 не более 0,005 % мол;

– точка росы воды не более минус 70 °С;

– содержание общей серы не более 0,010 г/м^3;

– содержание кислорода ввиду отсутствия в магистральном газе не превышает нормируемых показателей, и дополнительная очистка не требуется;

– для обеспечения показателя «мольная доля метана, не менее 99,0%» и «область значений числа Воббе (высшего)» следует обеспечивать коррекцию состава природного газа [1].

Одним из таких способов получения СПГ высокого качества является способ с применением полупроницаемых мембран и короткоцикловой адсорбции на стадии подготовки и применение азотного холодильного цикла на стадии сжижения. Применение азотного цикла целесообразно, поскольку неполное сжижение компонентов природного газа приводит к уменьшению доли метана, что приводит к нестабильной работе двигателя ввиду узких пределов его регулирования [2].

Таким образом, на первой стадии подготовки происходит предварительная очистка и осушка природного газа, а также обеспечивается коррекция углеводородного состава с целью достижения показателя «мольная доля метана, не менее 99,0%» с применением мембран. В зону низкого давления проникают водяные пары, углекислый газ, сероводород и тяжелые углеводороды. Метан является одним из наименее проникающих компонентов

Далее газ поступает в блок короткоцикловой адсорбции (КЦА), где происходит глубокая очистка от диоксида углерода и серосодержащих соединений и осушка газа до температуры точки росы в минус 70 °С.

Применение описанной выше технологии позволяет получать СПГ марки А с минимальными затратами без применения дорогостоящей низкотемпературной ректификации.

Литература

1. *Карпов А.Б., Козлов А.М., Жагфаров Ф.Г.* Современные методы анализа газа и газоконденсата. М.: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, 2015. 238 с.
2. *Кондратенко А.Д., Карпов А.Б., Козлов А.М., Мещерин И.В.* Российские малотоннажные производства по сжижению природного газа // Нефтегазохимия. 2016. № 4, С. 31–36.

УДК 533.6.011.5

Метод расщепления для моделирования газодинамических течений в произвольных трёхмерных областях

И.В. Лаптев, Д.В. Продан

Московский физико-технический институт (государственный университет)
Исследовательский центр им. М.В. Келдыша

В настоящее время проводятся исследования газодинамических процессов в перспективных двигательных и энергетических установках. При этом сложные геометрия трактов и структура потоков часто делают неприменимым двумерное приближение.

Требуется разработка вычислительного комплекса для трёхмерного моделирования, такого, чтоб с его использованием возможно было проводить расчёты в короткий срок и без привлечения значительных вычислительных мощностей.

Семейство методов расщепления использует упрощённые уравнения отдельных физических процессов, что позволяет достичь малых временных затрат на расчёт.

Предлагаемый метод является дальнейшем развитием метода частиц в ячейках Харлоу [1] и метода крупных частиц Белоцерковского и Давыдова [2] и представляет собой численное решение уравнений Эйлера с замыканием уравнением состояния идеального газа.

Для выполнения граничных условий на каждой грани внешней ячейки, обращённой наружу, строится фиктивная ячейка, параметры в которой задаются таким образом, чтоб интерполяция на реальную границу расчётной области удовлетворяла заданным уравнениям. (Условия нулевой компоненты скорости, нормальной к стенке, нулевых градиентов давления, энергий и плотностей на входе и выходе и т.д.)

На данный момент времени метод реализован на структурированных сетках с шестигранными элементами.

Расчётная схема для шестигранных ячеек приведена ниже.

I.а. Первый этап (эйлеров)

На данном этапе контрольные объёмы представляются «замороженными», т.е. масса не перетекает через их границы, а рассчитываются только изменения их скоростей и энергий соответственно давлениям на гранях. Тогда для каждой ячейки уравнения принимают следующий вид:

$$\overline{\boldsymbol{u}}^n = \boldsymbol{u}^n - dt\left(\sum_{i=1}^{6} S_i P_i^n \boldsymbol{n}_i\right)(V\rho^n)^{-1},$$

$$\overline{E}^n = E^n - dt\left(\sum_{i=1}^{6} S_i P_i^n \boldsymbol{u}_i^n \boldsymbol{n}_i\right)(V\rho^n)^{-1},$$

где n – номер шага по времени, V – объём ячейки, i – номер грани ячейки, $\boldsymbol{n}$ – единичный вектор нормали грани, направленный от ячейки, S – площадь грани. Значения с индексом i соответствуют значениям на гранях, получаемых интерполяцией значений из центров ячеек.

I.б. Применение граничных условий для $\overline{\boldsymbol{u}}$ и $\overline{E}$ в фиктивных ячейках.

II.а. Второй этап (лагранжев)

На данном этапе рассчитываются потоки через границы ячеек при возврате к эйлеровой сетке.

Для каждой ячейки поток через i находится по формуле

$$\begin{cases} dM_i^n = \rho^n \overline{\boldsymbol{u}}_i^n \boldsymbol{n}_i S_i, & \text{при } \overline{\boldsymbol{u}}_i^n \boldsymbol{n}_i \geq 0, \\ dM_i^n = \rho_i^{n*} \overline{\boldsymbol{u}}_i^n \boldsymbol{n}_i S_i, & \text{при } \overline{\boldsymbol{u}}_i^n \boldsymbol{n}_i \geq 0, \end{cases}$$

где ρ_i^{n*} – плотность в ячейке, соседней рассматриваемой по i грани.

Выразим итоговые параметры ячейки. Для этого введём вспомогательную функцию

$$D_i^n = f(\overline{\boldsymbol{u}}_i^n \boldsymbol{n}_i)$$

следующего вида: $\begin{cases} D_i(x) = 0, & \text{при } x \geq 0 \\ D_i(x) = 1, & \text{при } x < 0 \end{cases}$. Тогда для каждой ячейки:

$$\rho^{n+1} = \rho^n - dt\left(\sum_{i=1}^{6} dM_i^n\right)V^{-1},$$

$$\boldsymbol{u}^{n+1} = -dt\,\frac{\left(\sum_{i=1}^{6} D_i^n dM_i^n \overline{\boldsymbol{u}}_i^{n*} - \overline{\boldsymbol{u}}^n\left(\frac{\rho^n V}{dt} - \sum_{i=1}^{6}(1 - D_i^n)dM_i^n\right)\right)}{V\rho^n},$$

$$E^{n+1} = -dt\,\frac{\left(\sum_{i=1}^{6} D_i^n dM_i^n E_i^{n*} - E^n\left(\frac{\rho^n V}{dt} - \sum_{i=1}^{6}(1 - D_i^n)dM_i^n\right)\right)}{V\rho^n},$$

$$P^{n+1} = (E^{n+1} - \frac{\boldsymbol{u}^{n+1^2}}{2})\rho^{n+1}(\varkappa - 1),$$

где параметры, обозначенные *, отвечают значениям в центрах соседних по *i* грани ячеек.

II.б. Расчёт параметров в фиктивных ячейках для удовлетворения заданным граничным условиям.

Для гибкости метода была реализована поддержка блочной структуры сеток. Для сшивки используется интерполяция значений из ячеек одной сетки в центр фиктивной ячейки другой сетки.

Программная реализация метода использовалась для оценочных расчётов течения воздуха в модели двухпоточного воздухозаборного устройства гиперзвукового прямоточного воздушно-реактивного двигателя и тракте плазмотрона конструкции «Звезда».

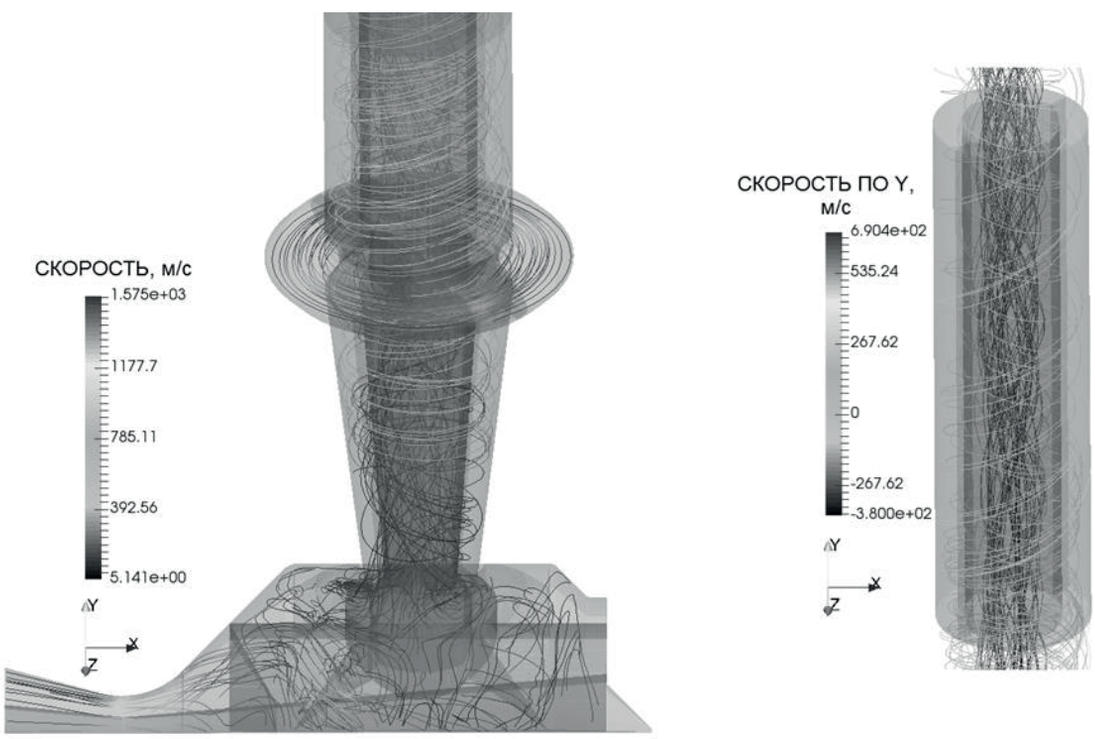


Рис. 1. Линии тока в электроде плазмотрона

Литература

1. *Evans M.W., Harlow F.H.* The particle-in-cell method for hydrodynamic calculations. Los Alamos Scientific Lab., Rept. №LA–2139. Los Alamos, 1957.
2. *Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М.* Метод крупных частиц в газовой динамике. Вычислительный эксперимент. М.: Наука, 1982. 393 с.

УДК 553.983

Моделирование процесса диффузии в нетрадиционных коллекторах

А.Д. Кадырова, А.Н. Хлюпин

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2]Инжиниринговый центр МФТИ по трудноизвлекаемым полезным ископаемым

В настоящее время наблюдается возросший интерес к нетрадиционным месторождениям углеводородов, в которых сосредоточены значительные запасы нефти и газа. При описании движения газа в нетрадиционных коллекторах становятся значительными некоторые физические процессы, которыми можно пренебречь при описании потока в традиционных породах. В данном случае в модели должно быть отражено влияние диффузии в керогене, десорбции, нелинейной фильтрации, эффекта Кликенберга, кнудсеновской диффузии [1]. Таким образом, учет вышеперечисленных процессов при построении моделей нетрадиционных месторождений представляется актуальной задачей. В настоящий момент объектом исследования научной работы является процесс диффузии газа из твердой фазы нетрадиционных коллекторов.

Исследования показывают, что структура нетрадиционных коллекторов характеризуется большой неоднородностью (наличием трещин, пор, отличающихся по масштабу на несколько порядков, в том числе нанопор, содержанием большого количества керогена) [2]. Главным эффектом для таких сред с большим контрастом свойств подобластей является появление памяти. Различная скорость протекания процессов в трещинах и в пористых блоках приводит к тому, что уравнение для трещин должно содержать член, описывающий массовый обмен с блоками с помощью интегрального оператора. С математической точки зрения эффект памяти представляет собой изменение типа уравнения на интегрально-дифференциальное. Таким образом, целью научной работы является исследование модели, обладающей эффектом памяти и описывающей фильтрацию и диффузию газа в нетрадиционных коллекторах.

В работе рассмотрена модель фильтрации газа с учетом эффекта диффузии [3]. Пласт представлен в виде протяженного слоя блоков, разделенных системой открытых трещин и пор. Система уравнений включает в себя дифференциальное уравнение в частных производных параболического типа для фильтрации в трещинах и интегральное уравнение Вольтерры второго рода с сингулярным ядром, описывающее диффузию в блоках:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial}{\partial t}\left[\gamma_o\rho(x,t)+(1-\gamma_o)(1-\gamma+\dfrac{\gamma}{v})c(x,t)\right]=kT\dfrac{\partial}{\partial x}\left[\dfrac{\rho(x,t)}{\mu}\dfrac{\partial\rho(x,t)}{\partial x}\right] \\ c(x,t)=c_0-\dfrac{3}{R}\sqrt{\dfrac{D}{\pi(1-\gamma+\dfrac{\gamma}{v})}}\displaystyle\int_0^t\dfrac{c(x,\tau)-v\rho(x,\tau)}{\sqrt{t-\tau}}d\tau \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $c(x,t)$ – концентрация молекул метана в блоках, $\rho(x,t)$ – плотность молекул метана в трещинах, γ – закрытая пористость, γ_0 – открытая пористость, k – проницаемость, T – температура, μ – вязкость, v – растворимость, D – коэффициент твердотельной диффузии, R – размер блоков.

Выполнена численная реализация одномерной модели фильтрации и диффузии газа на основе данной системы уравнений, моделирование проводилось с использованием полностью неявной конечно-разностной схемы. Исследована чувствительность полей давлений к изменению входных параметров. Проведен сравнительный анализ модели (1) и классической модели двойной пористости [4], в которой отсутствует эффект памяти в

источнике. Данный анализ позволяет оценить влияние эффекта памяти на распределение полей давлений.

В докладе будут рассмотрены подходы крешению задачи оптимального управления для забойного давления в среде с эффектом памяти.

Литература

1. *Wu Y.S.* [*et al.*]. Transient Gas Flow in Unconventional Gas Reservoir // SPE Europec/EAGE Annual Conference. – Society of Petroleum Engineers, 2012.
2. *Javadpour F.* [*et al.*]. Atomic-force microscopy: a new tool for gas-shale characterization //Journal of Canadian Petroleum Technology. 2012. V. 51. №. 04. P. 236–243.
3. *АлексеевА.Д.* [*идр.*].Диффузионно-фильтрационнаямодельвыходаметанаизугольногопласта //Журналтехническойфизики. 2007. Т. 77 № 4. С. 65–74.
4. *Баренблатт Г. И.* [*идр.*].Об основных представлениях теории фильтрации однородных жидкостей в трещиноватых породах // Прикл. математика и механика. 1960. Т. 24 №. 5. С. 852–864.

УДК553.982.2

Метод расчета продуктивности скважин на неустановившемся режиме работы с учетом кривой характеристики лифта

Е.А. Канин[1,2], В.А. Краснов[2]

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2]ОАО НК «Роснефть»

В настоящей работе предложен новый подход для расчета производительности скважин на неустановившемся режиме работы с учетом кривой характеристики лифта – зависимости забойного давления от дебита, а именно её линейной аппроксимации на рабочем диапазоне дебитов скважины. Разработанный подход применим для любой конфигурации скважины (вертикальная, горизонтальная скважина, трещина ГРП) и для однородных внешних граничных условий. В работе выведены соотношения, позволяющие получить решения для забойного давления и дебита скважины при условии, что известно решение задачи о работе скважины при постоянном дебите для соответствующей конфигурации скважины и внешних граничных условий. Также найденные соотношения позволяют учитывать эффект влияния ствола скважины.

В настоящее время значительная часть добычи нефти приходится на низкопродуктивные пласты с проницаемостью до нескольких миллидарси. Отличительной особенностью их эксплуатации является длительный (до нескольких месяцев) неустановившийся режим работы. Объемы нефти, добытые в течение этого периода, составляют значительную долю от общих запасов. Поэтому для наиболее эффективной разработки таких пластов необходимо учитывать нестационарность течения жидкости в пласте. Расчет потенциального дебита с учетом неустановившегося режима обеспечивает оптимальный подбор погружного оборудования, что позволяет на начальных этапах работы скважины достичь максимально возможных дебитов и существенно увеличить добычу. В связи с этим становится актуальным создание модели взаимодействия скважины и пласта в условиях нестационарного притока. Постановка граничных условий работы скважины с постоянным дебитом или с постоянным забойным давлением не всегда адекватно отражают процессы, происходящие при взаимной работе пласта и скважины. По этой причине в работе разрабатывается модель на основе решения уравнения фильтрации для упругого режима с заданием на скважине граничного условия третьего рода – линейной зависимости забойного давления от дебита. Решение задачи получено с применением метода преобразования Лапласа. В условиях неустановившегося режима найденные зависимости забойного давления и дебита от времени позволяют проводить

оценку технологических показателей работы скважины, например, оценку значения потенциального дебита, с учетом реальных условий ее эксплуатации.

Литература

1. *Van Everdingen A.F., Hurst W*. The Application of the Laplace Transformation to Flow Problems in Reservoirs // SPE Journal 949305-G. 1949. P. 305–324.
2. *Brown K.E., Lea J.F*. Nodal Systems Analysis of Oil and Gas Wells // SPE Journal14714-PA. 1985. P. 1751–1763.
3. *Brown K.E.* The Technology of Artificial Lift Methods. Tulsa: PennWellBooks, 1984. 448 p.
4. *Brill J.P., Mukherjee H.* Multiphase Flow in Wells. Texas: SPE Monograph, 1999. 156 p.
5. *Khasanov M.M., Khabibullin R.A., Musabirov T., Sokolov S., Krasnov V.A.*Express Method to Estimate Target Bottomhole Pressure in Pumping Oil Well (Russian) // SPE Conference 171303-RU. 2014.
6. *Cinco L.H., Samaniego V.F., Dominguez A.N.* Transient Pressure Behavior for a Well With a Finite-Conductivity Vertical Fracture // SPE Journal 6014-PA. 1978. P. 253–264.

УДК 66.078

Получение СПГ на газоперерабатывающих заводах

А.Б. Карпов

Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина

Мировая индустрия сжиженного природного газа (СПГ) включает крупнотоннажное производство, основная цель которого – поставка СПГ на мировые рынки, и малотоннажное производство, нацеленное на межрегиональную торговлю и удовлетворение спроса на внутреннем рынке [1]. При этом малотоннажное производство сжиженного природного газа занимает все более значительное место в структуре производства СПГ. Связано это с расширением областей применения как природного газа, так и СПГ [2].

Газомоторное топливо – это одно из перспективных направлений использования природного газа как в сжатом, так и в сжиженном виде. На сегодняшний день природный газ является наиболее экономичным, экологичным и безопасным топливом. Природный газ – это фактически готовое моторное топливо, поэтому он гораздо дешевле бензина и дизельного топлива. При этом двигатель такого транспортного средства соответствует высочайшим стандартам – Евро-5 и Евро-6.

СПГ может быть не только источником газомоторного топлива для автотранспорта, но и широко использоваться в качестве топлива для речных и морских судов, локомотивов, сельскохозяйственной техники, газоснабжения объектов вне пределов зоны обеспечения сетевым газом; развития малой энергетики, снятия пиковых нагрузок и т.д.

Фундаментом развития рынка газомоторного топлива является производственно-сбытовая инфраструктура для природного газа.

К настоящему моменту в России построены и введены в эксплуатацию несколько малотоннажных установок по производству сжиженного природного газа. Первые производства такого вида появились в Ленинградской и Московской областях в 90-х годах XX века. В начале 2000-х была пущена установка сжижения в Свердловской области. К настоящему времени были введены в эксплуатацию установки в Калининградской и Псковской областях, а также в Пермском крае [2].

Однако на сегодня в РФ СПГ производится в очень ограниченных объемах и существующие в РФ технологии и темпы строительства не позволят существенно нарастить объем СПГ до требуемого рынком уровня в ближайшее время. Нужны технологии, обеспечивающие быстрый ввод рентабельных производств СПГ, поэтому актуальным представляется создание именно средних локальных производств СПГ в радиусе рентабельной транспортировки (300–500 км). Такие производства могут быть интегрированы в газоперерабатывающие производства и комплексы (ГПЗ и ГПК) с целью минимизации сроков и стоимости их создания, снижения себестоимости СПГ.

Необходимо отметить мультипликативный эффект от создания такого производства – развитие смежных рынков, вовлечение соответствующих региональных машиностроительных предприятий, предприятий малого и среднего бизнеса, создание высокоэффективных рабочих мест, обеспечение энергетической безопасности регионов, актуализация и синхронизация региональных программ газификации, кластерного развития и развития корпоративных инновационных программ предприятий в связи с развитием рынка ГМТ и СПГ в РФ.

В качестве примера, рассмотрен вариант создания интегрированного СПГ производства на базе Миннибаевского ГПЗ.

При реализации данного проекта возможно значительное снижение себестоимости СПГ за счет использования существующих блоков и установок ГПЗ. Так, например, отсутствует необходимость предварительной подготовки и осушки газа, направляемого на сжижение ввиду осуществления данных операций на технологической линии ГПЗ. Также это относится и к объектам ОЗХ, которые будут общими для обоих производств.

Сравнение ежегодного дохода от реализации продукции при реализации совместного производства СПГ на базе Миннибаевского ГПЗ приведено в таблице 1.

Как видно из таблицы 1, при организации производства СПГ мощностью 56 тыс. т/год доходы предприятия от реализации продукции увеличатся более чем 2,2 млрд. руб./год.

Таким образом, ввиду высокой маржинальности продаж сжиженного природного газа, используемого в качестве моторного топлива, перспективно развитие малотоннажных процессов производства СПГ [4], а также установок, интегрированных в действующие ГПЗ.

Таблица 1

	Эффект от реализации проекта, млн руб./год	**СПГ, тыс. т/год**	**СОГ, млн м^3/год**
Текущая продукция ГПЗ (по данным [3])		-	262,66
Продукция ГПЗ при реализации Проекта		56	184,26
Цена реализации продукции		49*	5,7
Изменение доходов от реализации продукции, млн руб./год	**2 297,1**	2 744,0	- 446,9

**Из расчета межтопливной конкуренции с дизельным топливом*

Литература

1. *Голубева И.А., Мещерин И.В., Дубровина Е.П.* Производство сжиженного природного газа: вчера, сегодня, завтра // Мир нефтепродуктов № 6, 2016. С. 4–13.
2. *Кондратенко А.Д., Карпов А.Б., Козлов А.М., Мещерин И.В.* Российские малотоннажные производства по сжижению природного газа // НефтеГазоХимия № 4, 2016. С. 31–36.
3. *Голубева И.А., Мохова Д.А., Родина Е.В.* ПАО "Татнефть" и Миннибаевский ГПЗ (Управление "Татнефтегазпереработка") // Нефтепереработка и нефтехимия. № 11, 2016. С. 34–40.
4. *Кондратенко А.Д.* Разработка технологии подготовки природного газа для малотоннажного производства СПГ // в сб. трудов 71-й Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ – 2017», 2017. С. 176–181.

УДК 519.688

Моделирование двухфазных течений в дискретной системе трещин

А.В. Блонский[1,2], Д.А. Митрушкин[1,2], Е.Б. Савенков[1,2,3]

[1]Инжиниринговый центр МФТИ по трудноизвлекаемым полезным ископаемым
[2]Московский физико-технический институт (государственный университет)
[3]Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

В настоящее время до 40% мировой добычи углеводородов обеспечивается разработкой трещиноватых коллекторов, характерной особенностью которых является существенная анизотропия проницаемости, которая обусловлена наличием системы гидродинамически связанных или несвязанных трещин, расположенных в проводящей или непроводящей вмещающей среде – матрице. Для решения ряда прикладных задач разработки трещиноватых коллекторов, например прогнозирования добычи, необходим анализ течения флюидов с учётом реальной геометрии трещин.

Разработка методов математического моделирования течения жидкостей в трещиноватых коллекторах является предметом настоящей работы. В работе предложены математическая модель и вычислительные алгоритмы для моделирования двухфазных течений в системе пересекающихся трещин, расположенных в непроницаемой матрице, с учетом их реальной геометрии. Геометрия трещин описывается системой пересекающихся плоскостей с заданными на них полями раскрытия. Модель течения основана на приближении смазочного слоя с учетом гравитационных и капиллярных сил. Для учета перетоков между трещинами на линиях их пересечений введены дополнительные условия согласования, которые выражаются в виде непрерывности полей давления и потоков массы. Конечно-разностная аппроксимация уравнений выполнена методом Петрова–Галеркина (CV-FEM, Control Volume – Finite Element Method) на треугольных сетках [1].

Характерной сложностью рассматриваемой задачи является большой разброс величины раскрытия трещин, что приводит к образованию множественных фронтов вытеснения со сложной структурой. Хорошо известно, что среди возможных методов аппроксимации задачи по времени более аккуратное разрешение фронтов обеспечивают явные и явно-неявные методы (IMPES, Implicit Pressure Explicit Saturation), обладающие лучшими, по сравнению с полностью неявными аппроксимациями (FIM, Fully Implicit Method), диссипативными свойствами [2, 3]. Для достижения максимальной точности разрешения динамики фронтов флюида требуется, чтобы за шаг по времени фронт распространялся на расстояние порядка одного шага сетки (лучшего разрешения принципиально невозможно получить в независимости от используемого вычислительного алгоритма). Для схем типа IMPES данное условие совпадет с условием устойчивости. Однако, как условие фактической точности расчета, оно инвариантно относительно используемого численного алгоритма и должно выполняться и для полностью неявных аппроксимаций FIM. Другими словами, неявные аппроксимации позволяют использовать довольно большие шаги по времени, однако для обеспечения высокой точности расчета в любом случае необходимо выполнение условий типа Курранта. В данной ситуации, естественно, метод FIM неэффективен – время расчета по полностью неявной и явно-неявной схеме при равных шагах по времени может существенно отличаться для FIM в большую сторону.

Для достижения оптимальной скорости расчета, точности и устойчивости решения в данной работе предложено использовать метод SEQ (Sequential Solution) [2], в котором так же, как и в методе IMPES, система уравнений разделяется на уравнение для давления и уравнение для насыщенности. При этом для аппроксимации уравнения для насыщенности, в отличие от метода IMPES, используется неявная схема. В рамках данной работы были программно реализованы и протестированы три метода: IMPES, SEQ, FIM. По результатам тестирования оказалось, что метод SEQ на большинстве задач работает быстрее, чем метод FIM и IMPES. Исключением являются задачи, в которых капиллярные силы превышают вязкостные и определяют структуру и характер течения. В данном случае наиболее эффективным является метод FIM.

Разработанные математическая модель и алгоритмы реализованы в виде параллельного программного комплекса. Корректность реализованных алгоритмов и математической модели расчета двухфазных течений демонстрируется на примере решения ряда модельных задач, имеющих аналитическое решение. Исследовано влияние смачиваемости породы на процесс вытеснения нефти водой.

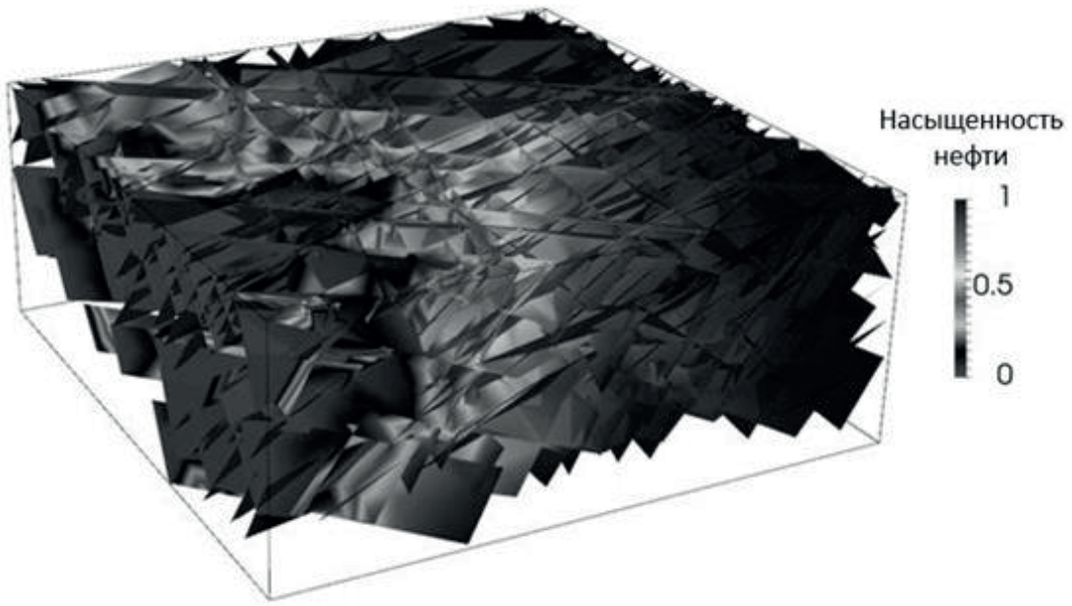


Рис. 1. Пример вытеснения нефти водой по системе трещин

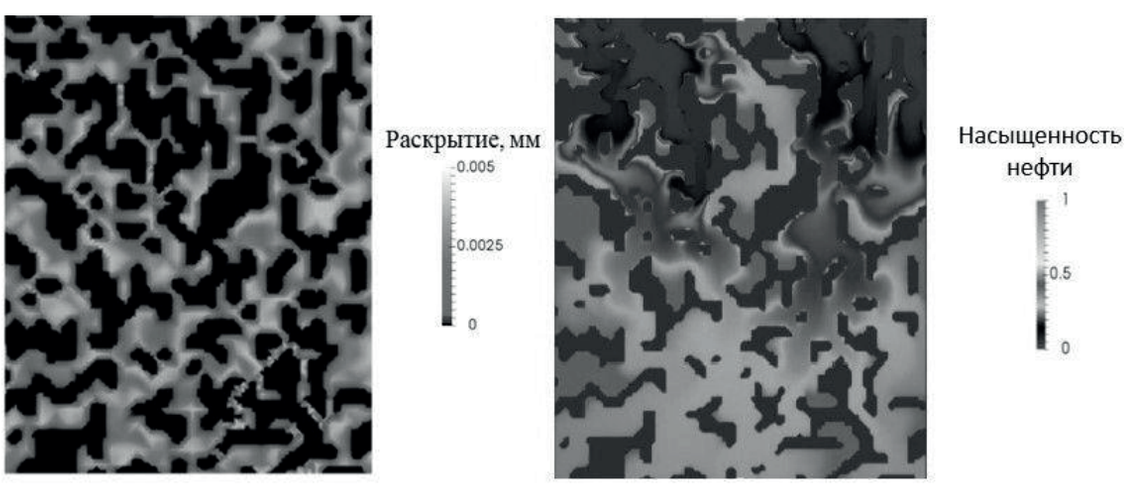


Рис. 2. Пример сложной структуры фронтов вытеснения нефти водой

Литература

1. *Monteagudo, J. E. P., and A. Firoozabadi*. Control-volume method for numerical simulation of two-phase immiscible flow in two- and three-dimensional discrete-fractured media // Water resources research. 2004. Т. 40. N 7.
2. *Азиз Х., Сеттари Э.* Математическое моделирование пластовых систем. М. Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. 407 с.
3. *Fanchi J.R.* Principles of Applied Reservoir Simulation // Gulf Professional Publishing, 2005.

УДК 532.54, 519.652

Метод ремасштабирования относительных фазовых проницаемостей на неструктурированных сетках

А.С. Ерофеев, Б.В. Васекин

Московский физико-технический институт (государственный университет)

При проведении гидродинамических (ГД) расчетов в ряде случаев возникает необходимость использовать грубые сетки, что требует проведения процедуры ремасштабирования исходной сеточной модели. При осреднении фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) важно иметь в том числе согласованные кривые относительных фазовых проницаемостей (ОФП).

В настоящее время разработаны эффективные динамические методы переноса ОФП для структурированных сеток [1–4]. Существующие требования к скорости и корректности расчета диктуют необходимость использования неструктурированных сеток [5] для учета особенностей месторождений (расположение скважин, трещин ГРП, разломов). Некоторые современные ГД-симуляторы (Intersect, Kappa Rubis) позволяют выполнять расчеты на таких сетках. Однако инструменты для корректного переноса ОФП на таких геометриях в них отсутствуют.

В настоящей работе предложен динамический метод расчета ОФП на неструктурированных сетках Вороного (PEBI-сетки). Для основных ФЕС (пористость и проницаемость) ремасштабирование выполнено стандартными методами [6]. Для получения псевдофункций ОФП на грани ячейки PEBI-сетки между ячейками i и j в каждый момент времени решается обратная задача:

$$\boldsymbol{k_{r\alpha i}(S_{\alpha i})} = \frac{\boldsymbol{u_{\alpha_{i-j}}\mu_{\alpha_i}B_{\alpha_i}}}{\boldsymbol{T\left(P_{\alpha_i}-P_{\alpha_j}-\frac{B_{\alpha_i}B_{\alpha_j}}{2(B_{\alpha_i}+B_{\alpha_j})}g(z_i-z_j)\right)}}, \quad (1)$$

где $k_{r\alpha i}$ – значение ОФП на грани PEBI-ячейки, $S_{\alpha i}$ – насыщенность фазы α в PEBI-ячейке, $u_{\alpha_{i-j}}$ – усредненный поток фазы α на грани PEBI-ячейки, μ_{α_i} – вязкость фазы α в ячейке, B_{α_i} – объемный коэффициент фазы α, $P_{\alpha_i} - P_{\alpha_j}$ – градиент давления фазы α на границе PEBI-ячейки, z_i – координата вдоль оси OZ.

Для определения потока u на грани PEBI-сетки используется метод обратных расстояний IDW [7]:

$$\boldsymbol{u} = \left(\sum_i \frac{\vec{\boldsymbol{n}}_{\boldsymbol{i}}(\boldsymbol{d_i}\cdot\boldsymbol{d_i})^{-1}}{\sum_j \vec{\boldsymbol{n}}_{\boldsymbol{j}}\left(\boldsymbol{d_j}\cdot\boldsymbol{d_j}\right)^{-1}}\boldsymbol{u_i}\cdot\vec{\boldsymbol{n}}\right), \quad (2)$$

где $\vec{n}$ – нормаль к грани PEBI-ячейки, u_i – поток на грани ячейки исходной сетки, $\vec{n}_i$ – нормаль к грани ячейки исходной сетки, d_j – расстояние от центра грани исходной ячейки до центра точки интерполяции.

Динамические поля (P_i, S_{wi}) корректируются после осреднения с учетом сохранения массы компонент в PEBI-ячейках, для чего решается система уравнений

$$\begin{cases} \sum_k \boldsymbol{V_k\varphi_k\left(1-S_{w_k}\right)B_{o_k}} = \boldsymbol{V_i\varphi_i(P_i)(1-S_{wi})B_{oi}(P_i)}, \\ \sum_k \boldsymbol{V_k\varphi_k S_{w_k}B_{w_k}} = \boldsymbol{V_i\varphi_i(P_i)S_{wi}B_{wi}(P_i)}, \end{cases} \quad (3)$$

где V_k – объем мелкой ячейки или ее части, φ_k – пористость в мелкой ячейке, V_i – объем PEBI-ячейки, $\varphi_i(P)$ – пористость в PEBI-ячейке.

После проведения расчетов для всех моментов времени в каждой ячейке кривые ОФП представляют собой набор точек. На основе данных по всем ячейкам сетки с помощью метода наименьших квадратов строятся заданного вида корреляции ОФП (Corey, LET [8]).

Апробация алгоритма была проведена на ряде тестовых задач и на модели реального месторождения. Полученные показатели разработки при расчете на ремасштабированных ОФП лучше совпадают с фактическими, чем при использовании исходных ОФП.

Литература

1. *Durlofsky L.J.* Upscaling and gridding of fine scale geological models for flow simulator // 8th International forum on reservoir simulation. 2005.
2. *Kyte J.R., Berry D.W.* New pseudofunctions to control numerical dispersion // SPE J. 1975. P. 269–276.
3. *Jacks H.* The modeling of a three-dimensional reservoir with a two-dimensional reservoir simulator - the use of dynamic pseudo functions // SPE J. 1973. P. 175–185.
4. *Stone H.L.* Rigorous black-oil pseudo functions // In SPE Symposium on Reservoir Simulation. 1991.
5. *Evazi M*. Vorticity-based PEBI grids for improved upscaling of two phase flow // EAGE Annual Conference and Exhibition. 2009.
6. *Barker J.W., Thibeau, S*. A critical review of the use of pseudo relative permeabilities for upscaling // SPE J. 1975. P. 138–143.
7. *Shepard D.* A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data // Proceedings of the 1968 ACM National Conference. 1968.
8. *Lomeland F., Ebeltoft E., Hammervold Thomas W.* A New Versatile Relative Permeability Correlation // Reviewed Proceedings of the 2005 International Symposium of the SCA 2005.

УДК 532.546

Методы определения проницаемости проппантной пачки

А.Н. Стерлев

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Проппант, или расклинивающий агент, – это гранулированный материал, который используется в нефтедобывающей промышленности при применении технологии гидроразрыва пласта (ГРП). Он служит для предупреждения смыкания трещин ГРП под действием горного давления. Оценка проницаемости проппантных пачек является важной научно-технической проблемой. Существуют различные методы определения данной характеристики, среди них экспериментальные, расчетные и аналитические. В данной работе представлены результаты определения проницаемости проппантных пачек в сплит-кор аппарате (экспериментальная модель трещины с проппантом внутри) различными способами.

Целью данной работы является выбор оптимальной формулы для оценки проницаемости исследуемых образцов по имеющимся данным о геометрическом строении трещины и ее содержимого. Данные о структуре порового пространства в трещине получают из результатов рентгеновской микротомографии. Такой метод позволит получать сведения о проницаемости исследуемого образца, не подвергая его исследованиям на фильтрационной установке, что в свою очередь позволит сэкономить исследуемые материалы, а также время, необходимое на фильтрацию флюидов через образцы.

В ходе работы было приготовлено три образца. В роли проппанта использовались два типа проппантного песка с диаметрами частиц, лежащими в диапазонах 105…210 мкм (П1) и 210…420 мкм (П2), а также стеклянные микросферы со средним диаметром 180 мкм. Керном для изготовления образцов был выбран мелкозернистый низкопроницаемый алевролит. Через готовые образцы изначально прокачивался 2-процентный водный раствор

KCl при обжимном давлении, а затем образцы сканировались на рентгеновском микротомографе.

Учитывая определенные экспериментально геометрию трещины, расход флюида и перепад давлений, проницаемость была расчитана по закону линейной фильтрации Дарси [1]:

$$K = \frac{Q \times \mu \times L}{S \times \Delta P}.$$

Используя данные сканирования образцов с помощью рентгеновского микротомографа, была оценена пористость пропантной пачки, а также получено объемное распределение частиц проппанта по размеру. Эти данные использованы для оценки проницаемости аналитическим путем. Существует несколько аналитических моделей для определения проницаемости [2]. Наиболее широко используемой на данный момент в литературе является формула Козени-Кармана [3]:

$$K = \frac{\varphi^3}{C_{kc} S^2 (1-\varphi)^2},$$

где φ – пористость, S – удельная поверхность частиц проппанта, C_{kc} – постоянная Козени, определенная экспериментальным путем и равная 5, по данным автора, формулы.

Комити и Ренау [4] модифицировали формулу Козени–Кармана, определив постоянную Козени с помощью извилистости τ и фактора формы пор γ:

$$K = \frac{\varphi^3}{2\gamma\tau^2 S^2 (1-\varphi)^2}.$$

Извилистость определяется на основе данных о пористости по следующей формуле:

$$\tau = 1 - Pln(\varepsilon).$$

Постоянная P определена экспериментально для частиц различной формы. В первом приближении мы рассматриваем наш проппант как частицы сферической формы. Поэтому в расчетах постоянная P равна 0,41. Помимо этого фактор формы пор γ равен 1 для проппантной пачки, состоящей из сферических частиц.

Результаты расчета проницаемости по формулам (2) и (3) в сопоставлении с экспериментальными данными представлены на рис. 1.

Результаты, полученные аналитическим путем, близки к данным, полученным экспериментально. Для микросфер и П1 оценка проницаемости с учетом извилистости оказалась хуже, чем оценка по классической формуле Козени–Кармана. Для П2 оценка с учетом извилистости оказалась более точной. Это указывает на необходимость изменения использованных в формулах констант для разных типов песка.

В дальнейшем планируется рассмотреть влияние отдельных параметров, входящих в исследуемые формулы, в зависимости от свойств исследуемых образцов, а также оценить некоторые параметры напрямую по результатам рентгеновской микротомографии, что обеспечить получение наиболее точного результата.

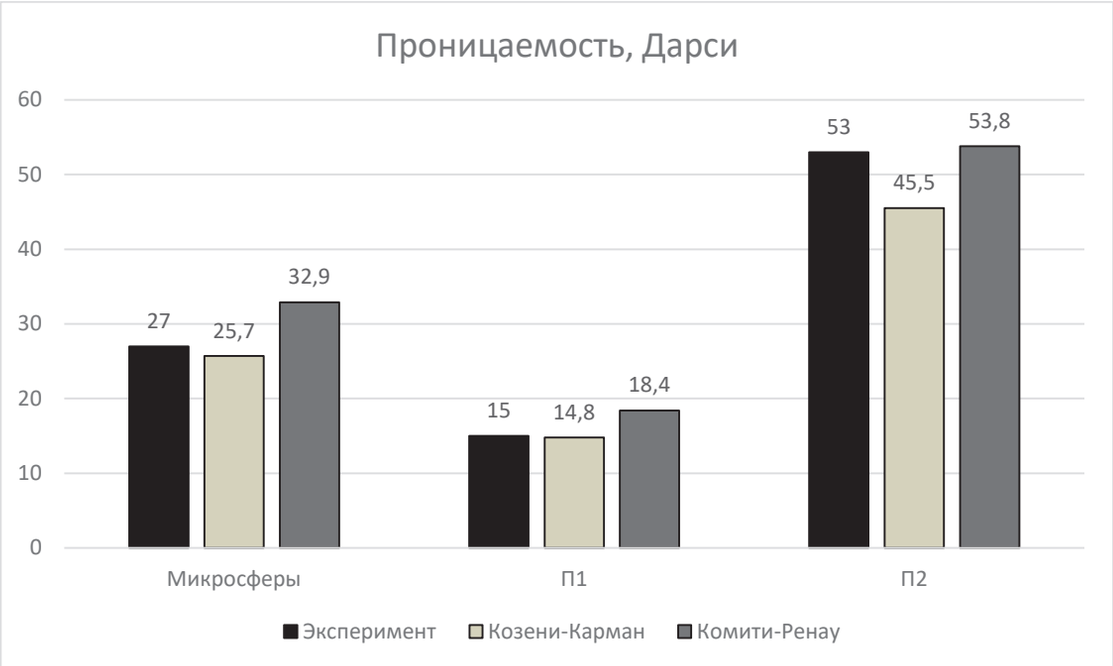


Рис. 1. Результаты оценки проницаемости различными методами

Литература

1. *Darcy H. Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Paris: Dalmont, 1856.*
2. *Bogda, A.* Predicting proppant pack permeability analytical model for multicomponent mixture// M&S: Schlumberger journal of modeling, design and stimulation. June 2014. V. 5.
3. *Carman P.C.* Flow of gases through porous media, Butterworths, London, 1956.
4. *Comiti J. and Renaud M.* A new model for determining mean structure parameters of fixed beds from pressure drop measurements application to beds packed with parallelepipedal particles// Chemical Engineering Science. 1989. V.44. issue 77. P. 1539–1545.

УДК 532.685

Алгоритмы расчета оптимальной системы разработки на скважинах со сложным заканчиванием

А.А. Бычков

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Целью данной статьи является реализация алгоритмов для проведения экспресс – оценок параметров работы скважин различного типа заканчивания на неустановившимся и псевдоустановившемся режиме эксплуатации. Для реализации данных алгоритмов были применены полуаналические решения. В данном подходе для построения моделей скважин использовались функции точечного источника, полученные при решении уравнения пьезопроводности в пространстве Лапласа для модели трещиновато-порового коллектора в форме параллелепипеда и цилиндра с различными комбинациями граничных условий. Широкая библиотека данных функций представлена в работе [1]. Переход из пространства Лапласа к зависимости от времени осуществлялся посредством численного преобразования Стефеста [6].

На рис. 1 и 2 представлены результаты работы алгоритмов для случая трещины ГРП частичного вскрытия и случая горизонтальной скважины. Для верификации реализованных алгоритмов был использован коммерческий гидродинамический стимулятор. Расхождение результатов составило ~ 10^{-2} атм.

Данные алгоритмы могут быть применимы не только для модели однородного трещиновато-порового коллектора, но также и для случая гетерогенного коллектора, когда поле проницаемости имеет стохастический характер. Метод, позволяющий распространить изложенный выше полуаналитический подход на случай более реалистичной модели гетерогенного коллектора, основан на описании среды в терминах эффективного скин-фактора s (для данного линейного сегмента скважины) и глобальной (эффективной) проницаемости k^*, которые связаны соотношением

$$S_{cyl} = \left(\frac{k^*}{k_a} - 1 \right) \ln \left(\frac{r_a}{r_w} \right),$$

где r_w – радиус сегмент скважины, r_a – параметр, связанный с длиной корреляции в гетерогенной среде, k_a – значение проницаемости в области $r_w < r < r_a$, k^* – значение эффективной проницаемости в области $r > r_a$ [2, 3].

Следующим этапом развития проекта является реализация алгоритмов для случая скважин произвольной пространственной ориентации, что даст возможность производить построение моделей скважин нетрадиционного типа (многозабойные скважины, скважины с МГРП и др.). Алгоритмы позволят быстро и корректно определять основные параметры системы закачивания проектируемых скважин. Использование численного подхода для подобных целей может оказаться ресурсоемким и занимать много времени. Основным методом интерпретации ГДИС является идентификация псевдорадиального притока, время наступления которого для систем сложного заканчивания может достигать нескольких лет. Быстрые алгоритмы дадут возможность проводить интерпретацию ГДИС на неустановившемся режиме.

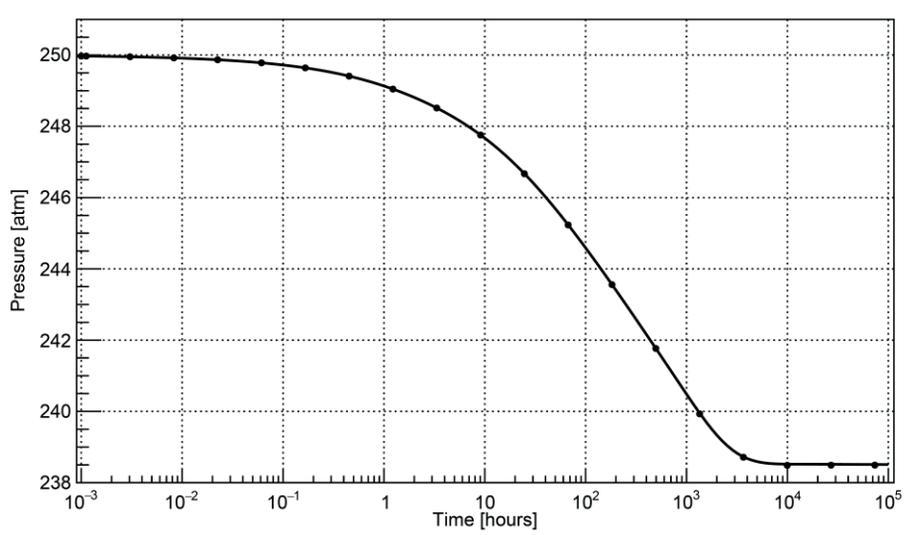


Рис. 1. Результаты работы коммерческого симулятора (кривая) и алгоритма (точки) для случая трещины ГРП, вскрывающей резервуар в форме параллелепипеда

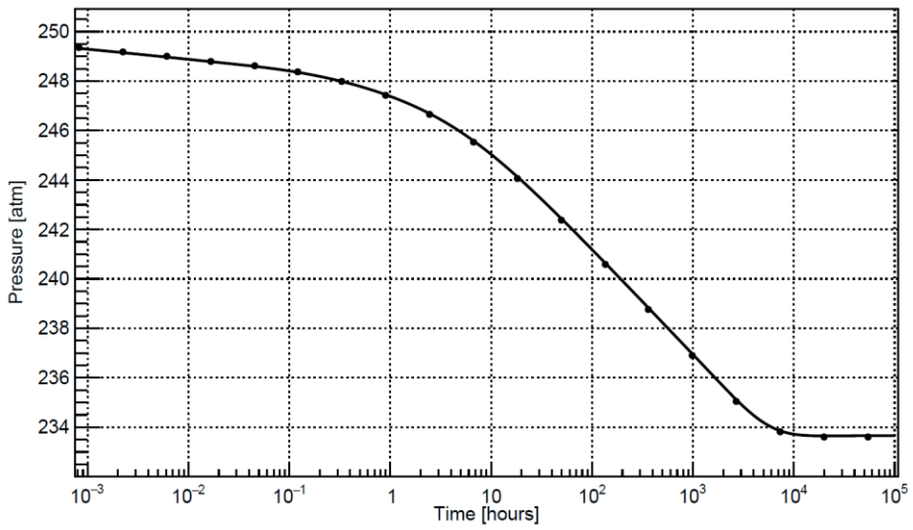


Рис. 2. Результаты работы коммерческого симулятора (кривая) и алгоритма (точки) для случая горизонтальной скважины, вскрывающей резервуар в форме параллелепипеда

Литература

1. *Ozkan E.* Performance of Horizontal Wells (Ph.D. Dissertation) // The University of Tulsa, Tulsa, Oklahoma, 1988.
2. *Louis J.* Durlofsky An Approximate Model for the Productivity of Non-Conventional Wells in Heterogeneous Reservoirs // SPE-56754-MS.
3. *Christian Wolfsteiner, Louis J. Durlofsky*, et all. An Approximate Model for the Productivity of Non-Conventional Wells in Heterogeneous Reservoirs // SPE 56754.
4. *Кондауров В.И.* Механика и термодинамика насыщенной пористой среды: Учебное пособие. М.: МФТИ, 2007. 310 с.
5. *Щелкачев В.Н.* Основы и приложения теории неустановившейся фильтрации: монография. В 2 ч. М.: Нефть и газ, 1995.
6. *Valkó P.P., Abate J.* Comparison of Sequence Accelerators for the Gaver Method of Numerical Laplace Transform Inversion // doi.org/10.1016/j.camwa.2002.10.017.

УДК 532.546

Моделирование поля давления при наличии дизъюнктивных нарушений геологической структуры

А.Е. Губанова[1,2], Е.В. Юдин[2]

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2]АО «Зарубежнефть»

Карты изобар широко используются при анализе состояния разработки месторождений и планировании геолого-технических мероприятий, поэтому оперативное построение достоверных карт давлений является одной из важнейших задач для любого нефтедобывающего предприятия. На практике значительное число таких карт строится методом интерполяции прямых замеров пластового давления. Для успешного применения данного метода необходим практически полный охват фонда скважин гидродинамическими исследованиями (ГДИС), что не всегда целесообразно из-за больших потерь добычи нефти во время их проведения. Другим недостатком метода является неконтролируемая погрешность при его реализации, возникающая ввиду разновременных замеров давлений [1]. Кроме того, поскольку традиционные методы интерполяции не

используют информацию о физике процесса, эти методы обычно приводят к нефизичному поведению поля давления как в межскважинных областях, так и в зонах с различными геологическими нарушениями пласта.

Полуаналитический метод фиктивных источников нахождения поля давления лишен вышеперечисленных недостатков. В его основе лежит фундаментальное решение уравнения Лапласа для бесконечной однородной и изотропной области (1):

$$\Delta\Psi(\vec{r}) = \delta(\vec{r}),\ \ \Psi(\vec{r}) = \frac{1}{2\pi}\ln\left|\vec{r}\right|. \tag{1}$$

Если месторождение содержит непроницаемые границы или зоны выклинивания, то необходимо наложить условия, гарантирующие отсутствие фильтрации жидкости в этих зонах. Этим условием является равенство нулю проекции вектора градиента пластового давления на непроницаемых границах. Для нахождения пластового давления нужно решать краевую задачу для уравнения Лапласа:

$$\Delta p = \sum_{i=1}^{N}\frac{\mu}{k}q_i\delta(\vec{r}-\vec{r}_i),\quad \left.\frac{\partial p}{\partial\vec{n}_i}\right|_{\Gamma_i} = 0,\ \mathrm{i} = 1,...,\mathrm{n'}-\mathrm{k},\quad p\big|_{\Gamma_j} = p_{0_j},\ j = n'-k,...,n'. \tag{2}$$

Для решения уравнения (2) применяется метод введения фиктивных источников, функционирование которых позволяет смоделировать граничные условия. Поскольку зоны тектонических нарушений могут иметь сложную геометрию и определить корректное расположение искусственных источников является нетривиальной задачей, то данный метод предлагается применить следующим способом. Аппроксимируем рассматриваемую зону выклинивания многоугольником $P_1P_2\ldots P_{n'}$. На каждом отрезке $[P_j, P_{j+1}]$, j = 1,…,n', входящем в границу многоугольника $P_1P_2\ldots P_{n'}$, размещаем распределенный по этому отрезку непрерывный фиктивный источник (сток). Изменение давления в пласте от функционирования такого источника в точке с радиус-вектором **r**:

$$p_j^{slot}(\vec{r}) = \frac{1}{L_j}q_j\int_{[P_j,P_{j+1}]}\ln\frac{\left|\vec{r}-\vec{r}_j^{\,slot}\right|}{R_k}dl, \tag{3}$$

где j – номер распределенного фиктивного источника (стока), $\mathbf{r}_j^{slot}$ – радиус-вектор переменной точки на отрезке $[P_j, P_{j+1}]$, L_j – длина отрезка $[P_j, P_{j+1}]$, q_j – мощность (дебит) распределенного фиктивного источника с номером j, R_k – радиус контура питания. Значение давления в месторождении от функционирования всех скважин в точке с радиус-вектором **r**:

$$p\left(\vec{r}\right) = p_0 + \sum_{i=1}^{N}\frac{\mu_i}{2\pi k_i h_i}Q_i\ln\frac{\left|\vec{r}-\vec{r}_i\right|}{R_k} + \sum_{j=1}^{n'}q_j\int\limits_{[P_j,P_{j+1}]}\ln\frac{\left|\vec{r}-\overrightarrow{r_j^{slot}}\right|}{R_k}dl, \tag{4}$$

где p_0 – начальное пластовое давление, k_i – проницаемость, μ_i – вязкость жидкости, h_i – толщина пласта. Условия отсутствия фильтрации жидкости или поддержания постоянного пластового давления на границах многоугольника находятся из уравнения (4) и принимают следующий вид:

$$\begin{cases} \sum_{s=1}^{N} \left. \frac{\partial p_s^{real}}{\partial \vec{n}_i} \right|_{[\mathrm{P}_i, \mathrm{P}_{i+1}]} + \sum_{s=1}^{n'-k} \frac{\partial p_s^{fic}}{\partial \vec{n}_i} = 0 \ \text{ на } \ [\mathrm{P}_j, \mathrm{P}_{j+1}], \ i = 1, ..., \mathrm{n}', \\ \sum_{s=1}^{N} p_s^{real} + \sum_{s=n'-k}^{n'} p_s^{fic} = 0 \ \text{ на } \ [\mathrm{P}_j, \mathrm{P}_{j+1}], \ j = n'-k, ..., n'. \end{cases} \quad (5)$$

Выбрав одну контрольную точку на каждом отрезке [P_j, P_{j+1}] и решив систему уравнений (5), можно однозначно определить мощности фиктивных источников q_j и тем самым решить задачу моделирования граничных условий.

На основании изложенного выше метода был создан программный модуль, позволяющий моделировать произвольное расположение зон выклинивания и скважин и строить карты давлений с учетом их влияния. В процессе реализации были смоделированы как простые формы месторождений, имеющие аналитическое решение, выраженное через форм-фактор [1], так и более сложные (рис. 1), включая реальное месторождение «Белый Тигр» компании АО «Зарубежнефть» (рис. 2). По мере усложнения программы также была добавлена возможность моделирования трещин и горизонтальных скважин посредством введения скин-фактора [2]. Результаты были верифицированы как с аналитическими расчетами (где они имеются), так и с вычислениями коммерческого программного продукта KAPPA SAPHIR. Расчеты выполняются с хорошей точностью (~ 10%) и высокой скоростью (~ 10 с).

В результате проделанной работы был реализован алгоритм, основными преимуществами которого являются: достоверность оценок пластового давления даже при отсутствии замеров ГДИС, высокая скорость расчетов, возможность моделирования дизъюнктивных нарушений пласта, трещин и горизонтальных скважин, учет неоднородности проницаемости.

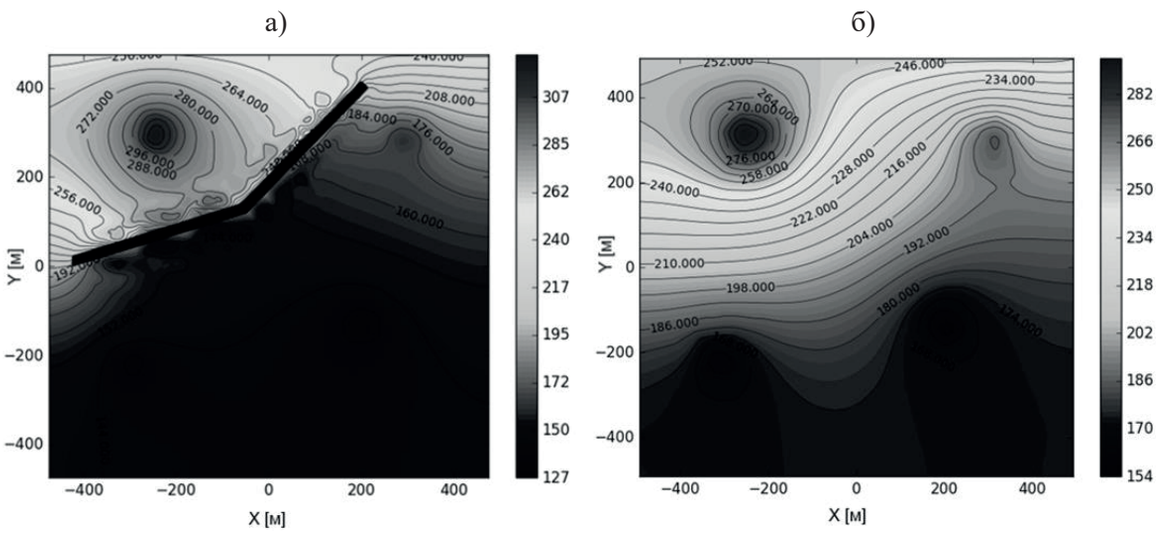


Рис. 1. Карта поля давления с учетом непроницаемой зоны (а) и без учета (б) – при прочих равных условиях

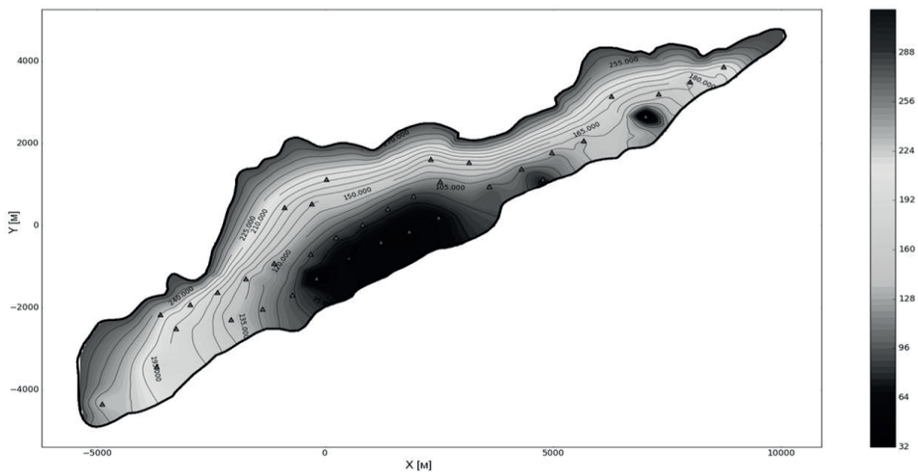


Рис. 2. Карта изобар центрального свода месторождения Белый Тигр

Литература

1. *Игнатов И.С.* [*и др*.]. Методика построения карт изобар с использованием результатов гидродинамических исследований и промысловых данных на примере Верх-Тарского месторождения // Научный журнал: Нефтяное хозяйство. 2009.
2. *Leif Larsen* Wellbore Pressures in Reservoirs with Constant-Pressure or Mixed No-Flow/Constant-Pressure Outer Boundary // SPE Rogaland Research Inst. 1984. P. 1613–1616.
3. *Besson J.,* [*et al.*]. Performance of Slanted and Horizontal Wells on an Anisotropic Medium // European Petroleum Conference, 21–24 October, The Hague, Netherlands. 1990. P. 219–231.

Секция прикладной механики

УДК 539.422.32

Экспериментальное определение критической пористости стали 12Х21Н10Т, при которой теряется несущая способность

А.А. Быков, В.С. Молчанов, Н.В. Бурtелова

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Известно, что в высокопластичных сплавах при пластическом деформировании возникает большое количество пор (как в виде трещин, так и в виде "пузырьков") [1]. В результате, когда расстояние между порами и их размер достигают критических значений, появляется соединяющая их крупная трещина. В такой момент детали конструкций и механизмов делятся на части, то есть теряется их несущая способность.

Исследование данных процессов является практически важным в аэрокосмической отрасли, так как некоторые детали изделий (например, жидкостного ракетного двигателя (ЖРД)) в штатных условиях эксплуатации пластически деформируются. Поэтому для точного прогнозирования запаса прочности изделий необходимо определение критических параметров напряженно-деформированного состояния, при которых возникает потеря несущей способности.

В данной работе были проведены экспериментальные исследования по растяжению гладких цилиндрических образцов и образцов с концентраторами напряжений, нагружение которых было остановлено до их разделения на части. Затем с помощью метода рентгеновской томографии исследовалась их внутренняя структура с одновременным определением пористости в различных точках и фиксировался факт образования крупной трещины (см. рис. 1). Далее в сечениях, перпендикулярных оси образца *А–А*, определялась зависимость пористости от расстояния до оси (см. рис. 2). Такие сечения выбирались рядом с трещинами, чуть выше или чуть ниже их. Можно полагать, что поры в данных точках прекращают изменяться, так как рядом с трещиной материал испытывает частичную разгрузку и более пластически не деформируется, и значение пористости при дальнейшем нагружении образца сохраняется. Считая, что трещина возникает в момент, когда пористость принимает некоторое критическое значение (максимальное в образце), оно определяется по графикам (см. рис. 2). Всего было испытано на растяжение 6 гладких образцов и 3 с концентраторами напряжений. В результате получено, что при значении пористости, находящемся в диапазоне 0,2–1,3%, несущая способность материала теряется.

Также следует указать, что расчеты пластических деформаций проводят в предположении неизменности объема материала. Возникновение большого количества пор позволяет в дальнейшем использовать предположение о сплошности среды, но считать объем неизменным. При использовании предположения о несжимаемости материала общую ошибку расчетов можно оценить значением пористости.

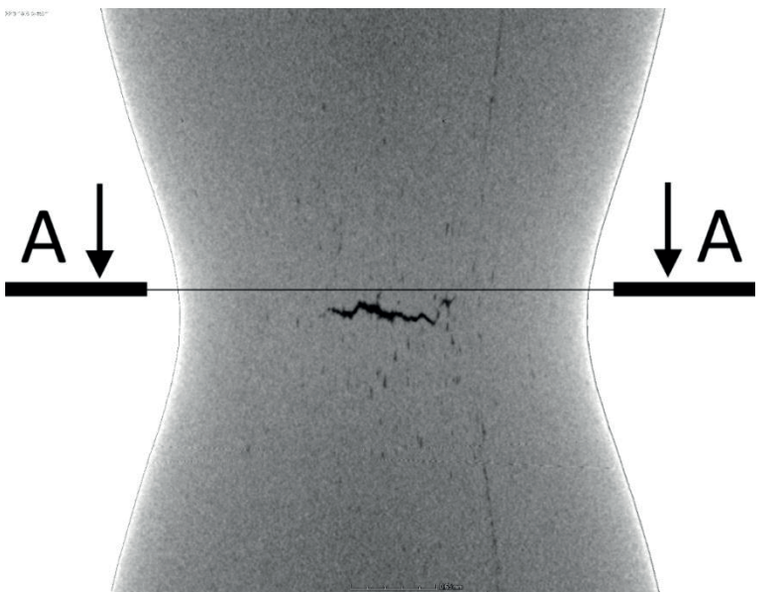


Рис. 1. Томографическое изображение осевого сечения образца с трещиной. А–А – сечение, в котором определяется распределение пористости

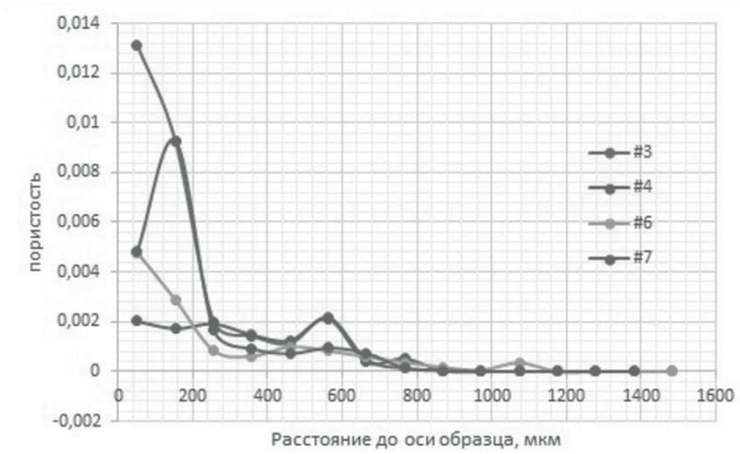


Рис. 2. Зависимость пористости от расстояния до оси образцов

Литература

1. *Lemaitre J.* A course on Damage Mechanics. Heidelberg: Springer-Verlag, 1992. 280 p.
2. *Krajcinovic D.* Damage mechanics. Amsterdam. Elsevier Science, 1996. 762 p.

УДК623.482

Математическое моделирование выседания частиц аэрозоля из потока на поверхность нагретого сенсора

***Ю.О. Алексеева*[1], *С.А. Бобков*[2]**

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2]Центральный научно-исследовательский институт химии и механики

В работе исследована динамика аэрозольных частиц, выседающих на поверхность нагретого полупроводникового металлооксидного газового сенсора, с учётом температурного поля вокруг сенсора [1–3].

В ходе выполнения исследования предложена математическая модель для изучения волновых и конвективных процессов динамики аэрозолей. Данная модель в своей работе

использует адаптивные иерархические сетки в области вблизи поверхности сенсора, а также в областях вблизи стенок канала, в котором реализован поток с аэрозольной примесью. Кроме того, для частиц аэрозолей произведён учёт диффузии, турбулентной вязкости и пристеночного трения [4]. При этом не учитывалось взаимодействие частиц аэрозоля друг с другом (испарение и конденсация для жидких фракций, агрегация (слипание в кластеры) и дробление твёрдых фракций и т.д.), что приемлемо лишь при малых объёмных концентрациях аэрозольных примесей. Разработан программный комплекс, реализующий работу описанной модели. Разработан стенд, на котором проведена серия экспериментов с выседанием аэрозолей на поверхность нагретого сенсора. Сделано сравнение численных расчётов на основе программного комплекса с экспериментальными данными.

Литература

1. *Пузач С.В., Поляков Ю.А., Кабанов Д.Г., Мордашов С.В.* Применение интегральных металлооксидных сенсоров для диагностики дымовых газов и аэрозолей // Труды российской национальной конференции по теплообмену – 4. 2006. Т. 1. С. 201–204.
2. *Бутурлин А.И., Заикин В.А., Иванов А.Е.* Химический сенсор на основе оксида цинка для обнаружения аэрозолей // Труды 3-го научно-технического семинара по электронным датчикам. 1989. Т. 1. С. 98–99.
3. *Евстафьев И.Б., Никитаев С.П., Потылицын И.Ю., Алексеев С.А., Ермолаева Ю.О., Негодяев С.С., Рыжаков М.В.* Особенности применения отечественных газовых металлооксидных сенсоров в современных приборах контроля химической обстановки // Труды 57-й научной конференции МФТИ «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в современном информационном обществе». 2014.
4. *Патанкар С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: энергоатомиздат, 1984. 124 с.

УДК 531

Моделирование процесса уплотнения пропанта в трещине ГРП и определение её эффективной проводимости

И.М. Перепечкин[1], А.А. Быков[1], Н.А. Завьялова[1], Г.В. Падерин[2]

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2]ООО «Газпромнефть Научно-Технический Центр»

В настоящее время гидроразрыв пласта (ГРП) является одним из самых востребованных методов стимулирования добычи нефти. Под гидроразрывом подразумевается создание высоко проводящего канала в пласте с целью увеличения коэффициента продуктивности. Процесс создания такого канала можно условно разделить на две стадии: первая заключается в закачке жидкости с целью инициализации и роста трещины ГРП, во время второй происходит закачка жидкости с добавлением гранулообразного материала – пропанта. Пропант вводится с целью предотвращения смыкания трещины после прекращения нагнетания жидкости и создания в трещине канала повышенной проницаемости. Проводимость пропантной упаковки и пространственное распределение пропанта определяют продуктивность трещины ГРП. В данной работе предлагается постановка и решение задачи определения фильтрационных свойств пропанта в условиях его уплотнения в трещине ГРП.

Фильтрационные свойства пропанта при сжатии изменяются в сторону уменьшения проницаемости. Для определения степени сжатия в каждой точке трещины необходимо решить систему уравнений (1), описывающую его уплотнение под действием упругой реакции породы и сжимающих напряжений в плоскости трещины. Используются следующие обозначения: P – давление в трещине, E – модуль Юнга, υ – коэффициент Пуассона, h_p – раскрытие трещины с пропантом под действием сжатия, h_0 - раскрытие

трещины с пропантом без сжатия, P_{pore} – поровое давление, σ_z – сжимающее напряжение. Приведенное уравнение является модификацией уравнения для расчета давления в плоской трещине [1], но отличается от него тем, что неизвестным является не только раскрытие, но и давление, причем раскрытие зависит от суммарного сжатия как $h_p = h_0 f(P+\sigma_z)$. Функция f известна и дана в паспорте пропанта. В уравнение заложена возможность расчета не полностью сомкнутой трещины, что может наблюдаться при сильно неоднородном распределении пропанта:

$$\begin{cases} P(x,y) = -\dfrac{E}{8\pi(1-\upsilon^2)} \iint\limits_{\Omega} \dfrac{\Delta h(x',y')}{\sqrt{(x-x')^2+(y-y')^2}}\, dx'dy', \\ h_p = h_0 f(P+\sigma_z), \text{ в случае сдавливания пропанта,} \\ P = P_{pore}, \text{ в случае повисания трещины.} \end{cases} \quad (1)$$

Результатом решения уравнения является поле раскрытия трещины с пропантом в сжатом состоянии, из которого можно получить его степень сжатия и проницаемость, соответствующую этому сжатию. В качестве примера предлагается рассмотреть распределение пропанта, показанное на рис. 1 справа.

Как видно, присутствует резкий скачок в распределении пропанта посередине трещины, который привел к отсутствию смыкания трещины на пропанте и образованию сверхпроницаемого канала, см. рис. 2. После того как из решения получена информация о раскрытии и степени сжатия пропанта, задача нахождения проницаемости трещины в каждой точке решается тривиально, так как для пропантов, используемых на практике, зависимость проницаемости от сжимающих напряжений известна.

В работе поставлена и решена задача уплотнения пропанта. Постановка задачи и её решение уникальны и не встречаются в литературе. Решение позволяет с высокой точностью предсказать фильтрационные характеристики трещины ГРП. Практическое применение результатов работы повысит точность планирования ГРП и снизит риски.

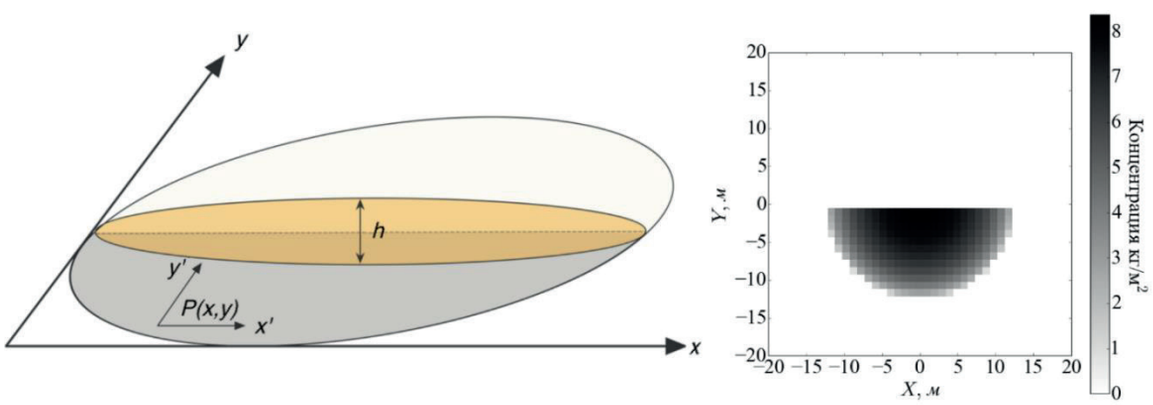


Рис. 1. Схема трещины с обозначениями (слева) и распределение пропанта (справа)

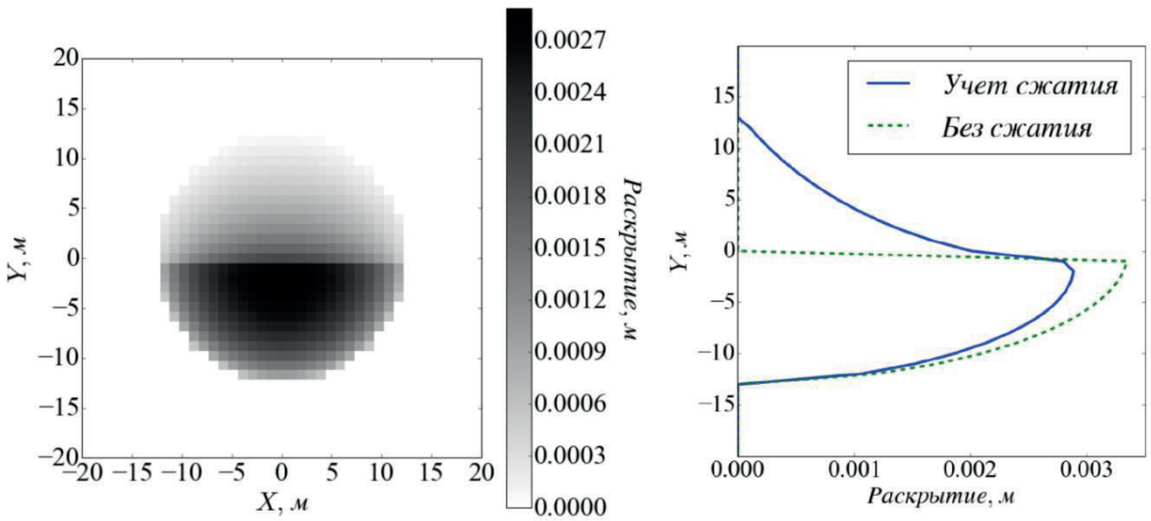


Рис. 2. Поле раскрытия в плоскости трещины с учетом сжатия (слева) и поле раскрытия в разрезе (справо)

Литература

1. *Atroshchenko E.* Stress Intensity Factors for Elliptical and Semi-Elliptical cracks subjected to an arbitrary mode I loading.: Waterloo, Ontario, Canada 2010.

УДК 532.546.6

Лабораторное исследование колебаний давления при фильтрации с выделением газовой фазы

И.Н. Завьялов, Е.В. Пляшков, Р.А. Плавник

Московский физико-технический институт (государственный университет)

В настоящее время имеются крупные трудноизвлекаемые запасы углеводородов, извлечение которых требует развития оригинальных методов добычи. Одним из методов увеличения нефтеотдачи является использование кислотной обработки пласта. Суть метода заключается в закачке в пласт кислот, способных растворять часть скелета и создавать высокопроницаемые каналы. Однако в настоящий момент процесс фильтрации с изменением фазового состава фильтрующихся компонент из-за химических превращений изучен мало.

Ранее было обнаружено, что фильтрационный изотермический процесс с выделением газовой фазы может быть нестабилен [1, 2]. Авторы указывают, что фильтрация окислителя происходит волнами, названными «вторичными волнами окисления». Однако в ходе указанных работ не было выполнено исследований, описывающих параметры, от которых зависит или не зависит частота и амплитуда вторичных волн окисления.

Целью данной работы является лабораторное исследование зависимости частоты и амплитуды вторичных волн окисления от градиента давления, вызывающего фильтрацию.

Для проведения экспериментальной работы использовалась плоская ячейка размерами 350×200×45 мм, образованная двумя прозрачными пластинами из поликарбоната с внутренним пространством размерами 350×160×15 мм. В верхней части ячейки установлены выходы трубок, соединенных с перистальтическим насосом, и система поддержания постоянного давления из тонких трубочек. Вдоль ячейки располагаются 15 датчиков давления с шагом 20 мм.

В начале эксперимента ячейка заполнялась стеклобисером, смешанным с восстановителем (пищевой содой), после чего смесь насыщалась минеральным маслом.

Далее через подающую трубку закачивался окислитель (раствор лимонной кислоты). В результате фильтрации окислителя через модель пористой среды наблюдались вторичные волны окисления, возникающие с некоторым постоянным периодом.

В экспериментах на датчиках давления наблюдались периодические колебания давления, пример показаний датчиков давления представлен на рис. 1. Изменение профилей давления при прохождении волны окисления представлено на рис. 2. Спектр колебаний давления представлен на рис. 3.

График зависимости периода колебаний от градиента давления представлен на рис. 4.

В результате экспериментальной работы было установлено, что период колебания давления во вторичных волнах окисления не зависит от градиента давления (рис. 4).

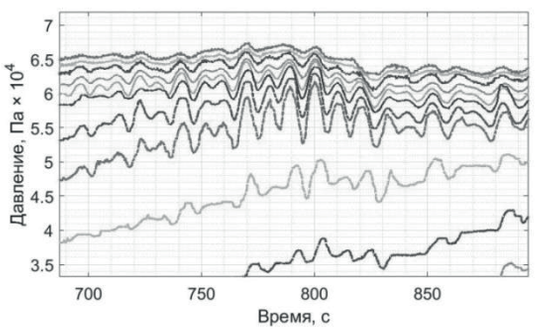


Рис. 1. Показания датчиков давления

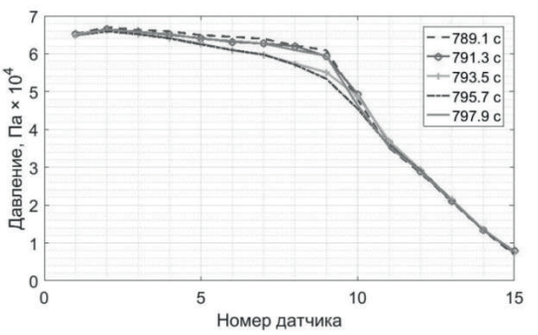


Рис. 2. Профили давлений при прохождении волны окисления

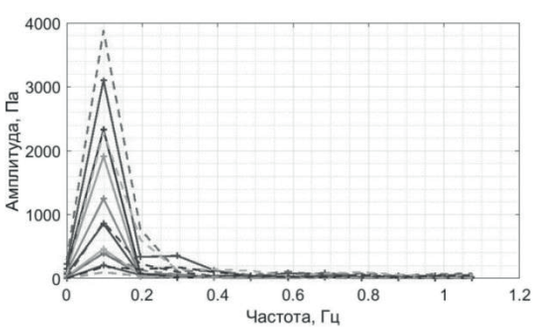


Рис. 3. Спектр колебаний давления

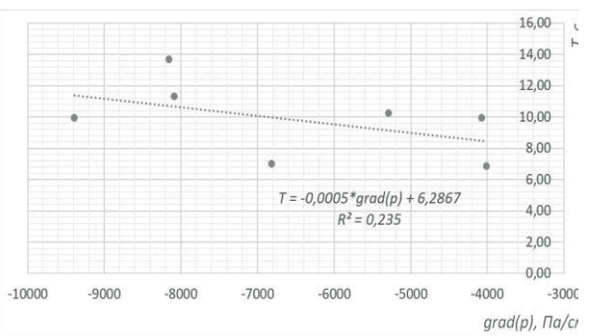


Рис. 4. Зависимость периода колебаний давления
от градиента давления

Литература

1. *Konyukhov A.V., Zavialov I.N.* Numerical investigation of oscillatory multiphase flow in porous medium with chemically active skeleton //Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2016. V. 774. N 1. P. 012059.
2. *Konyukhov A.V., Zavialov I.N.* Influence of time-delayed reaction on stability and transition to self-oscillating mode of multiphase flow in porous medium // Turbulent Mixing and Beyond Sixth International Conference Tenth Anniversary Program, The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Italy, 2017. P. 22.

УДК 669.162.1: 669.046

Исследование влияния микроструктурных характеристик железорудных окатышей с различными модифицирующими добавками на их прочностные свойства

Л.О. Шихалиева, Т.В. Никитченко

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Микроструктура обожженных окатышей является важной характеристикой, определяющей их физико-химические свойства, в том числе прочностные [1, 2]. В работе [3] выявляется и исследуется взаимосвязь параметров микроструктуры окатышей с их трещиноватостью, как основного фактора, влияющего на прочность.

Одним из основных методов изучения микроструктуры окатышей является метод растровой электронной микроскопии (РЭМ), который позволяет определить химический состав в любой точке шлифа.

В данной работе использованы экспериментальные окатыши, которые были получены в рамках работы [4] по повышению прочностных характеристик окатышей путем добавления в базовую рецептуру различных модифицирующих добавок.

Были проведены сравнительные исследования различных областей шлифов окатышей базовой серии, окатышей с добавкой доломита 0,8% и с добавкой силиката натрия 0,06%. Результаты микроструктурного и химического анализа этих серий сопоставлялись с результатами, полученными для окатышей базового спекания с целью выявления факторов, формирующих высокие прочностные свойства. Характеристическая прочность для окатышей базовой серии составляла 326,3 кг/окатыш, для окатышей с добавкой доломита 0,8% (360 кг/ок) и с добавкой силиката натрия 0,06% (348 кг/ок).

Было получено, что в сравнении с базовыми и остальными экспериментальными окатышами окатыши с добавкой доломита 0,8% имеют самые высокожелезистые связки по всему объему образцов (рис. 1). Если в связках во внешней области базовых окатышей ~ 42% оксида железа, то в связках внешней области образцов с добавкой доломита оксида железа ~ 53%.

Такая же динамика прослеживается и для связок в центральных областях окатышей: связка базового образца содержит ~ 29% оксида железа, связка образца с добавкой доломита содержит ~ 43% оксида железа. Это свидетельствует о том, что, претерпевая расплав, компоненты доломита ассимилируют в себе мелкие фракции железорудного концентрата, железо, содержащееся в них, растворяется и обогащает связку. В результате чего диагностируется высокожелезистый расплав.

Опытно, промышленные образцы с силикатом натрия, в сравнении с образцами базового спекания, также имеют железосиликатные связки с более высоким содержанием железа, что является признаком повышенных прочностных характеристик окатышей.

Кроме того, в пленках стеклофазы гематитовой оболочки окатышей обнаружено более низкое, чем в стеклофазе ядра, содержание оксидов кремния, алюминия и щелочей при повышенном содержании в стеклофазе компонентов флюса: оксидов магния и кальция.

Выявлено, что добавка силиката натрия оказывает положительное влияние на прочностные свойства окатышей благодаря своему механизму расплавообразования. В процессе твердофазного спекания силиката натрия с железорудными зернами концентрата образуется соединение, температура плавления которого, согласно тройной диаграмме SiO_2–Fe_2O_3–$Na_2O{\cdot}SiO_2$, ~ 760 °С. Данная легкоплавкая связка образуется еще в зоне нагрева температурного обжига. За счет взаимной диффузии данный расплав “склеивает” частицы концентрата и удерживает их на последующих стадиях обработки.

Кроме того, добавка силиката натрия представляет собой соль сильного основания – едкого натра NaOH и слабой кремниевой кислоты H_2SiO_3. Добавка щелочи в шихту железорудных окатышей позволяет повысить прочность обожженных окатышей за счет интенсификации поверхностной диффузии на твердофазной стадии спекания.

Установлено также, для получения высокой степени окисления магнетитовых окатышей, характерной для высокой прочности образцов [2], магнетитовое зерно должно быть более мелким.

Ядро окатышей с доломитом 0,8% представлено как магнетитовое с частично окисленными по краям зернами (рис. 2).

Разные по цвету области говорят о разном содержании Fe (эл., %) в них. Чем темнее область, тем больше интенсивность окисления этих зерен. Это также подтверждается распределением содержания Fe в железорудных зернах по всему объему окатышей (табл. 1).

При повышении крупности магнетитового зерна необходимо увеличивать продолжительность высокотемпературного окислительного процесса на обжиговой машине для достижения высоких показателей прочности образцов.

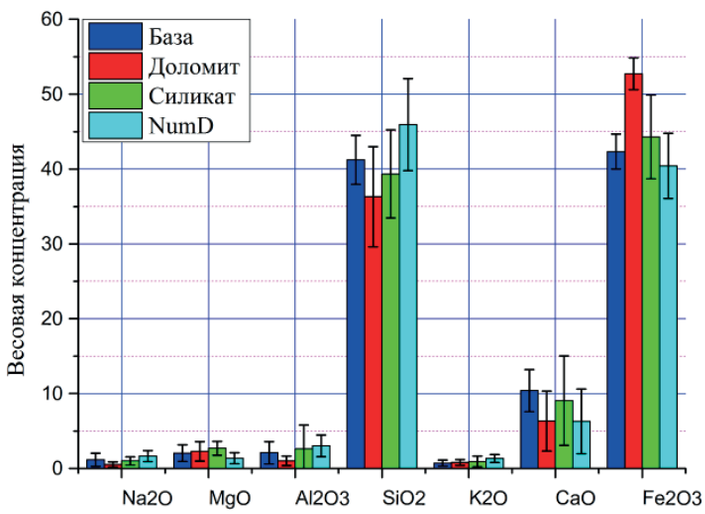


Рис. 1. Сравнение весовых концентраций оксидов в связках между образцами

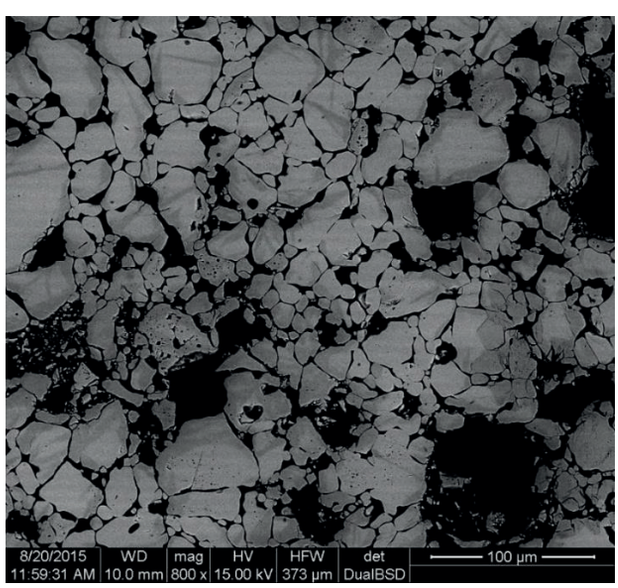


Рис. 2. Изображения микроструктуры ядра окатышей с добавками доломита 0,8%, полученные на детекторе обратно рассеянных электронов, увеличение x800, получаемое при разных параметрах контрастности: светлое и темное зерно, выбранное при рентгеноспектральном микрозондировании для определения химического состава

Таблица 1.

Распределение содержания Fe в железорудных зернах в окатышах с добавками доломита 0,8%

Содержание Fe в зернах, %					
оболочка	периферия	ядро / светлое зерно	ядро / темное зерно	периферия	оболочка
69,03	69,04	71,15	70,61	71,31	69,22

Литература

1. *Модель М.С., Лядова В.Я., Чугунова Н.В*. Ферритообразование в железорудном сырье. М.: Наука, 1990. 152 с.
2. *Малышева Т.Я.* Железорудное сырье: упрочнение при термообработке. М.: Наука, 1988. 199 с.
3. *Хопунов Э.А.* Структурно-механическая модель прочности окатышей // Обогащение руд. 2011. №4. С.21–26.
4. *Шихалиева Л.О., Ширяева Е.В., Марютина Т.А., Никитченко Т.В*. Изменение прочностных свойств железорудных окатышей путем ввода в шихту модифицирующих добавок и замены флюса // Сталь. 2016. №5. С. 2–5.

УДК: 519.6

Моделирование фильтрации в области с неоднородностями с использованием неструктурированных сеток

В.В. Родин, Н.А. Завьялова

Московский физико-технический институт (государственный университет)

В задачах математического моделирования притока нефти к горизонтальным скважинам возникает необходимость корректного учета неоднородностей. К таким объектам относятся области, обладающие проницаемостью, отличной от проницаемости среды, иными словами, трещины и скважины. Эти неоднородности создают вокруг себя возмущения, внутри которых важен корректный учет изменения физических величин.

Обычно, ввиду сложности самих задач фильтрации, для упрощения вида матриц используются схемы первого порядка аппроксимации по пространству. Их использование на регулярных сетках приводит к появлению сеточной анизотропии и вычислительных артефактов. Для коррекции этой ошибки необходимо при решении обеспечить условие перпендикулярности потоков граням ячеек расчетной сетки, что не всегда возможно при использовании прямоугольной сетки.

В настоящей работе реализован алгоритм построения и проверки PEBI (perpendicular bisector) сетки для двухмерного случая, представляющей собой диаграмму Вороного. Для распределения «центров» ячеек был предложен свой алгоритм, заключающийся в классификации точек и ячеек в зависимости от их положения в области. Для построения самих ячеек используется алгоритм Форчуна [1], обеспечивающий линейно-логарифмическую сложность процедуры. В качестве неоднородностей при расчетах используются два типа – точка и кривая (см. рис. 1).

Для проверки корректности построения самой сетки проверялась соответствующая триангуляция Делоне на предмет содержания остроугольных треугольников. Итоговая диаграмма Вороного также проверялась визуально. Для визуализации результатов и построения диаграммы Вороного использовались библиотеки GEOMPACK [2] и CGAL [3].

Полученная сетка позволила использовать двухточечную аппроксимацию для вычисления потока на каждой грани и корректно учесть соответствующие неоднородности.

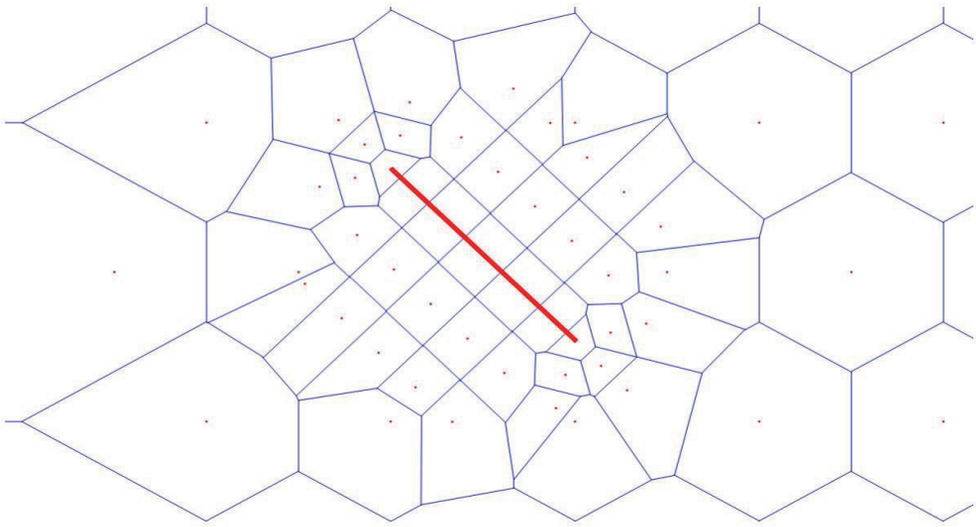


Рис. 1. Диаграмма Вороного для прямоугольной области, содержащей прямую

Литература

1. Личная страница Стивена Форчуна. URL: http://ect.bell-labs.com/who/sjf/
2. Библиотека GEOMPACK. URL: http://jamwarrior.narod.ru/sources/Geompack.rar
3. Библиотека CGAL. URL: https://www.cgal.org/

Секция управления в технических и социально-экономических системах

УДК 164.01/65.011.42/504.064.43

Оптимизация логистической деятельности как инструмент снижения выбросов парниковых газов

А.А. Ореховская

Московский физико-технический институт (государственный университет)

В настоящее время на большинстве энергопотребляющих предприятий происходят выбросы парниковых газов, что несет непоправимый урон окружающей среде в качестве глобального потепления. В связи с этим были приняты международные нормативные документы, обязывающие компании непрерывно контролировать свои выбросы на каждом этапе логистической цепочки. Также была создана система квотирования, своего рода поощрения компаний за то, что при производстве они не достигли ограничений на выбросы парниковых газов. Так появилось понятие «зеленая логистика».

Концепция «зеленой логистики» предполагает, что компании уделяют внимание тем затратам, которые напрямую связаны с изменением внешней среды вследствие производственных отходов [1]. «Зеленые» технологии логистической деятельности, позволяющие сократить воздействие на окружающую среду становятся необходимыми в деятельности каждого предприятия не только с целью заботы о климатических условиях, но и с целью привлечения клиентов [2].

На основе следующих материалов:

- стандарта в области учета и контроля парниковых газов ISO 14064;
- положения климатической доктрины Российской Федерации;
- Киотского протокола;
- опыта международных компаний, успешно внедряющих «зеленые» технологии;
- системы квотирования

– описаны различные пути снижения выбросов парниковых газов путем усовершенствования логистической деятельности. Например, применение многооборотной тары и упаковки, повышение грузоподъемности транспортных средств, минимизация затрат тепловой энергии при погрузке-разгрузке товаров и другие [3].

На первый взгляд кажется, что ограничения на выбросы CO_2 только создают трудности предприятиям. Но, на самом деле, большинство зарубежных компаний смогли путем снижения энергопотребления добиться огромных успехов благодаря корректным планам оптимизации логистических операций [4]. Для установления определенной мотивации российских предприятий рассмотрены прикладные программы и программное обеспечение по снижению выбросов парниковых газов, действующие сейчас в передовых зарубежных компаниях.

Таким образом, показаны преимущества «зеленой» логистики, в связи с которыми важность перехода российских компаний на стратегию энергоэффективности становится все более очевидной.

Литература

1. *Кизим А., Кабертай Дж.* Современные тренды «зеленой логистики» в условиях глобализации // Логистика. 2013. №1. С. 46–49.
2. *Капустина Л.М.* «Зеленые технологии в логистической деятельности» // Известия УрГЭУ. 2016. № 2(64). С. 114–122.

3. *Рыкалин А.* Логистическое обеспечение и сопровождение реализации экологических ресурсосберегающих проектов // Логистика. 2015. №11. С. 46–50.
4. *Грицевич И.Г., Кокорин А.О., Юлкин М.А.* Бизнес и климат. Мировой опыт компаний в деле снижения выбросов парниковых газов. М.: ЮНЕП, WWF–Россия. 2005. 32 с.

УДК 544.558; 544.528

Модификация акриловых полимеров в плазме ВЧ-разряда в комбинации с УФ-излучнием

Аунг Мьят Хейн, А.Б. Варгин, Т.М. Васильева, М.Н. Васильев

Московский физико-технический институт (государственный университет)

На современном стоматологическом рынке присутствует широкий спектр полимерных материалов для изготовления разнообразных конструкций, призванных восполнить утраченные анатомические образования организма – стоматологические и челюстно-лицевые протезы, искусственные клапаны сердца, сосудистые стенты, элементы опорно-двигательного аппарата [1, 2]. В настоящее время наиболее распространенными материалами являются традиционный полиметилметакрилат (ПММА), а также метилметакрилат (ММА), представляющий собой сложный метиловый эфир метакриловой кислоты.

Однако одной из основных проблем использования ПММА и ММА для производства протезов и имплантатов являются их низкая поверхностная энергия и достаточно высокая гидрофобность, что затрудняет применение этих акриловых пластмасс в качестве основы для современных композитных материалов биомедицинского назначения и снижает их биосовместимость с тканями организма человека [3, 4].

Одним из наиболее перспективных и современных методов модификации и функционализации поверхности полимеров с целью повышения их поверхностной энергии, гидрофильности и биосовместимости является воздействие низкотемпературной плазмы газовых разрядов (тлеющего, барьерного, коронного и др.) [5, 6], а также УФ-излучения [7].

Целью настоящего исследования была отработка подходов к модификации акриловых пластмасс при комбинации двух видов воздействия, ведущих к радикалообразованию, а именно ВЧ-разряда и УФ-излучения.

Задачами работы являлись:

- модификация ПММА и ММА в низкотемпературной плазме ВЧ-разряда при влиянии УФ-излучения, а также комбинированном воздействии этих двух факторов;
- характеристика гидрофильных свойств (краевого угла смачивания и свободной поверхностной энергии) модифицированных полимеров.

Для генерации плазмы ВЧ-разряда использовали ВЧ-генератор GenesisGHW-12 (MKSInstruments, Великобритания) с частотой 13,6 МГц, при различных мощностях 50–100 Вт. В качестве плазмообразующей среды использовали химический чистый кислород (SigmaAldrich, Германия) и воздух (влажность 30%) при давлении 3 Торр, время обработки (τ) составило 2 и 10 мин. В качестве источника УФ-излучения в рабочую камеру помещали ртутную лампу HNS-15W (OSRAM, Россия), работающую в режиме длин волн 200–400 нм. При длине волны 254 нм мощность УФ-излучения лампы составляла 4,9 Вт. Фотография процесса обработки ПММА и ММА в комбинации ВЧ-разряда с УФ-излучением показана на рис. 1. Гидрофильно-гидрофобные свойства обработанных полимеров были охарактеризованы с помощью измерения контактного угла смачивания по воде и дийодметану и определения свободной поверхностной энергии по методу [8].

Краевой угол смачивания по воде ММА и ПММА понижался по сравнению с исходными образцами как после модификации в плазме ВЧ-разряда, так и после комбинированного воздействия плазмы ВЧ-разряда и УФ-излучения. Полученные результаты свидетельствуют об улучшении его гидрофильных свойств и образовании на

поверхности полимеров полярных функциональных групп –COOH, –COH, C=O (при обработке в среде кислорода) и $–NH_2$ (при обработке в среде воздуха).

Гидрофильные свойства зависели от длительности процесса обработки и мощности ВЧ-разряда. Смачиваемость поверхности возрастала при увеличении мощности. Так, краевой угол по воде уменьшался после модификации в течение 2 мин в плазме ВЧ-разряда в воздухе (мощность 100 Вт) с 78° (необработанная поверхность) до 23°. При этом поверхностная энергия составила 41,4 мН/м и 74,18 мН/м соответственно.

Комбинированное воздействие плазмы ВЧ-разряда и УФ-излучения привело к дополнительному улучшению гидрофильности поверхности, что наблюдалось при использовании ВЧ-разряда мощностью 50 Вт. Краевой угол смачивания по воде при комбинированном воздействии на ПММА ВЧ-разряда кислорода и УФ-излучения в течение 10 мин уменьшался в 2 раза по сравнению с немодифицированным образцом (с 66,4º до 30,7º). Поверхностная энергия образцов ПММА, обработанного в плазме ВЧ-разряда вместе с УФ-излучением при длительности обработки 10 мин, возрастала по сравнению с исходным образцом с 49,44 мН/м до 68,7 мН/м. В случае поверхностной энергии особенно заметна ее зависимость от длительности модификации – при увеличении времени обработки в 5 раз поверхностная энергия образцов возрастала с 42,9 мН/м до 68,7 мН/м, т.е. наблюдалось существенное усиление гидрофильности материала. Эффект сохранялся в течение по крайней мере одной недели после плазмохимической модификации в ВЧ-разряде и при комбинированном воздействии ВЧ-разряда и УФ-света.

При использовании ВЧ-разряда повышенной мощности (100 Вт) синергизма плазмохимической компоненты и УФ-излучения не наблюдалось. Вероятно, в этом случае происходит ускоренная фотодеградация и старение поверхностных слоев полимера, в результате чего повышается его гидрофобность [9].

Таким образом, экспериментально доказана возможность улучшения гидрофильных свойств акриловых полимеров в низкотемпературной плазме ВЧ-разряда и при комбинированном воздействии плазмы ВЧ-разряда и УФ-излучения. Причем при модификации полимеров в плазме ВЧ-разряда мощностью 50 Вт и УФ-излучением наблюдается синергизм этих факторов.

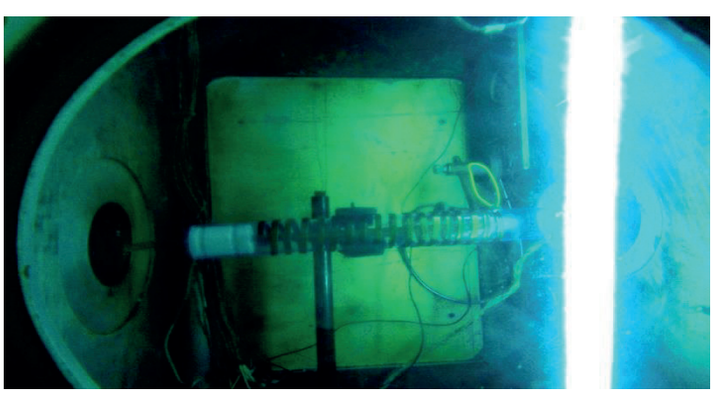


Рис. 1. Фотография процесса модификации ПММА и ММА внутри кварцевого реактора

Работа поддержана грантом РФФИ 15-08-05724_а.

Литература

1. *Клемин В.А, Ворожко А.А.* Современное состояние вопроса выбора материала для ортопедического лечения больных, нуждающихся в съемном протезировании // Дальневосточный медицинский журнал. 2015. N 1. С. 41–46.
2. *Hergelová B, Homola T, Zahoranová A, Plecenik T, Kováčik D, Matoušek J.* Plasma Surface Modification of Biocompatible Polymers Using Atmospheric Pressure Dielectric Barrier Discharge // WDS'12 Proceedings of Contributed Papers. 2012. Part II. P. 128–133.
3. *Hoffman A.S.* A general classification scheme for "hydrophilic" and "hydrophobic" biomaterial surfaces // J Biomed. Mater. Res. 1986. V. 20.

4. *Kaufman H.E, Katz J, Valenti J, Sheets J.W, Goldberg E.P.* Corneal endothelium damage with intraocular lenses: contact adhesion between surgical materials and tissue // Science. 1977. V. 198. P. 525–527.
5. *Рыбкин В.В.* Низкотемпературная плазма как инструмент модификации поверхности полимерных материалов // Соросовский образовательный журнал. 2000. Т. 6. С. 58–63.
6. *Koodaryan R., Hafezeqoran K.* Surface modification of dental polymers by plasma treatment: a review // Biomed. Pharm. J. 2016. V. 9, N 1. P. 317–321.
7. *Ahad I.U.I., Bartnik A., Fiedorowicz H., Kostecki J., Korczyc B., Ciach T., Brabazon D.* Surface modification for biocompatibility via exposure to extreme ultraviolet radiation // J. Biomed. Mater. Res. Part A. 2014. V. 102A. P. 3298–3310.
8. *Owens D.K., Wendt R.C.* Estimation of the surface free energy of polymers // J. Appl. Polym. Sci. 1969. V. 13. P. 1741–1747.
9. *Гришанова И.А., Абдуллин И.Ш., Абуталипова Л.Н., Мигачева О.С.* Влияние ультрафиолетового излучения на поверхностные свойства модифицированных сверхмодульных полиэтиленовых волокон // Вестник казанского технологического университета. 2013. Т. 16, N 2. С. 102–104.

УДК 544.546:544.431.7; 533.9.004.12

Пучково-плазменные технологии переработки природных полимеров

Кхин Маунг Хтау, Зау Йе Мьинт, Хтет Вэй Ян Чжо, Т.М. Васильева

Московский физико-технический институт (государственный университет)

В настоящее время резко возросла востребованность природных полимеров – целлюлозы, лигнина, хитина и его деацетилированного производного хитозана. Это связано с широким распространением этих полимеров в природе и возобновляемостью их сырьевых источников. Кроме того, биополимеры обладают уникальным комплексом свойств: низкой токсичностью, высокой комплексообразующей активностью, хорошей совместимостью с тканями организма, способностью к биодеградации и др. [1–3]. Среди областей, где применяются биополимеры, можно назвать целлюлозно-бумажную промышленность, текстильное производство, энергетику, сельское хозяйство, биотехнологию, медицину, косметическую промышленность.

Для многих уже доведенных до реальных продуктов и технологий, так и для перспективных применений целлюлозы, хитина и хитозана представляют либо их водорастворимые низкомолекулярные (с молекулярным весом менее 10 кДа) формы, либо наноразмерные структуры, такие как наноцеллюлоза.

Плазмохимическая модификация/предобработка природного сырья позволяет добиться увеличения выхода целевых продуктов (например, биотоплива), сократить экономические и временные затраты на следующих этапах их переработки и получить продукты, способные улучшить качество и технологические свойства новых материалов.

В настоящей работе для переработки природных полимеров предлагается использовать неравновесную электронно-пучковую плазму (ЭПП), которая генерируется при инжекции электронного пучка в различные газы, пары неорганических и органических веществ, а также парогазовые смеси и аэрозоли [4–6]. В типичных условиях генерации ЭПП сильно неравновесна: в ее составе присутствуют молекулы, атомы, радикалы и ионы в основном и в возбужденном состояниях, а также электроны плазмы и электроны инжектируемого пучка. Концентрации тяжелых частиц плазмы существенно их равновесные значения, что и определяет высокую химическую активность ЭПП.

Целью настоящей работы было прямое экспериментальное доказательство возможности получения низкомолекулярных водорастворимых форм хитина, хитозана и целлюлозы пучково-плазменными методами.

Рис. 1 иллюстрирует схему работы перемешивающего устройства и сам процесс ЭПП-обработки порошков биополимеров. Сформированный в высоком вакууме ($\sim 10^{-5}$ Торр) электронный пучок (ЭП) (3) инжектировался в заполненную плазмообразующей средой реакционную камеру (6) через газодинамическое выводное окно (4), при этом формировалось облако химически активной ЭПП (7). ЭП сканировали в

круглый растр с помощью электромагнитной системы (5), что повышало равномерность обработки материала (10). Барабан устанавливали в реакционной камере так, что его ось совпадала с осью инжекции ЭП. Расстояние от выводного окна до барабана выбирали так, чтобы облако ЭПП было локализовано преимущественно внутри барабана. Температура образцов измерялась оптическим пирометром Optris LS (Optris GmbH, Германия) и в большинстве экспериментов не превышала 50 ºС. Сила тока пучка I_b подбиралась таким образом, чтобы поддерживать постоянным указанное значение температуры, и варьировалась в пределах $1 < I_b < 100$ мА. Энергия электронов на входе в реакционную камеру была постоянной и составляла 30 кэВ. В экспериментах в качестве плазмообразующего газа использовались кислород, азот, инертные газы, пары воды и аммиак. Величины давления плазмообразующих газов варьировались в следующих пределах: кислород, азот, аргон, аммиак – 1–10 Торр; пары воды – 4–15 Торр; гелий – 10–40 Торр.

В работе были использованы высокомолекулярные хитин (средневязкостная масса, M_v = 1000 кДа) и хитозан (M_v = 500 кДа), со степенью дезацетилирования 85% и полидисперсностью 2.5, а также микрокристаллическая целлюлоза (M_v = 1000 кДа) и гидролизный лигнин.

Молекулярную массу продуктов, полученных в ходе плазмохимической модификации, осуществляли с помощью гельпроникающей ВЭЖХ. В результате анализа было показано, что при ЭПП-обработке всех образцов хитозана происходило формирование низкомолекулярных продуктов деструкции, что, вероятно, связано с действием активных частиц плазмы (особенно активных форм кислорода) на β-1,4 гликозидные связи природного биополимера.

Молекулярная масса для наибольшего пика у полученных хитоолигосахаридов варьировалась в пределах 570–815 кДа и практически не зависела от молекулярного веса исходного хитозана. Значения средневесовых и среднечисловых молекулярных масс продуктов деструкции соответствовали набору олигомеров хитозана от димера до гептамера с преобладанием тримера. При анализе ЭПП-обработанной целлюлозы были получены аналогичные данные. Это позволяет предположить наличие общего механизма деполимеризации вне зависимости от природы полисахарида и его молекулярной массы. В то же время обработка в ЭПП лигнина практически не влияла на размер макромолекул.

При этом крайне важно оптимизировать время обработки. Так, независимо от молекулярного веса образцов хитозанов, выход на плато по выходу низкомолекулярных продуктов происходил в течение первых двух минут после начала обработки. При недостаточном времени пучково-плазменного воздействия не происходило полной деполимеризации, в то время как излишнее время обработки приводило к появлению продуктов конденсации олигомеров хитозана за счет взаимодействия альдегидных и аминогрупп, а также продуктов деструкции сахаридных звеньев.

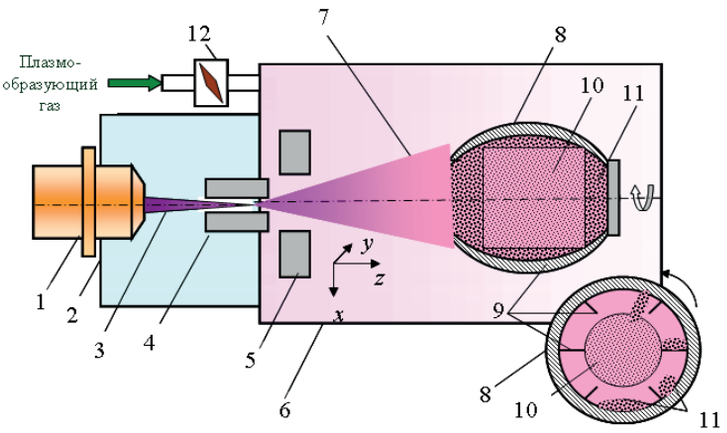


Рис. 1. Схема плазмохимического реактора и процедура обработки порошков полисахаридов во вращающемся барабане: 1 – электронная пушка; 2 – высоковакуумная камера; 3 – электронный пучок; 4 – выводное устройство; 5 – электромагнитная отклоняющая система; 6 – рабочая камера; 7 – облако ЭПП; 8 – кварцевая труба; 9 – внутренние ребра; 10 – реакционная зона; 11 – порошок обрабатываемого полисахарида; 12 – регулируемый натекатель

Работа поддержана грантом РФФИ 15-08-05724_а.

Литература

1. *Zargar V., Asghari M., Dashti A.* A review on chitin and chitosan polymers: structure, chemistry, solubility, derivatives, and applications // ChemBioEng Reviews. 2015. V. 2, N 3. P. 204–226.
2. *Biederman H.* Plasma polymers and some biomedical applications // European Cells and Materials. 2003. V. 6, Suppl. 1. P. 28.
3. *Демина Т.С., Гильман А.Б., Акопова Т.А., Зеленецкий А.Н.* Модифицирование структуры и свойств хитозана с использованием методов химии высоких энергий // Химия высоких энергий. 2014. Т. 48, № 5. С. 339–349.
4. *Васильева Т.М., Лопатин С.А., Варламов В.А.* Получение низкомолекулярных форм хитина и хитозана в электронно-пучковой плазме // Химия высоких энергий. 2016. Т. 50, № 2. С. 155–159.
5. *Vasilieva T., Lopatin S., Varlamov V., Aung Tun Win.* Controllable degradation of polysaccharides stimulated by electron-beam plasma // 22nd International Symposium on Plasma Chemistry. 2015. P–II–11–11.
6. *Vasilieva T.* A beam-plasma source for protein modification technology // IEEE Transactions on Plasma Sciences. 2010. V. 38. N 8. P. 1903–1907.

УДК 62-822+537.622.4

Инженерная методика расчета и экспериментальные исследования платформы для активной виброзащиты

В.П. Михайлов, Л.А. Тун

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

В современном мире производство микроэлектронной продукции связано с множеством проблем, одной из которых является воздействие вибраций на технологическое оборудование. При изготовлении микроэлектронных компонентов, размеры которых не превышают нескольких микрометров, малейшие вибрации приводят к браку, поэтому необходима виброзащита платформ, на которых установлено оборудование [1, 2]. В МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре «Электронные технологии в машиностроении» была разработана платформа для активной виброзащиты. Платформа содержит нижнюю и

верхнюю плиты, четыре активных демпфера и четыре узла упругой подвески с массовым корректором, расположенных равномерно по периметру платформы (рис. 1).

Была разработана инженерная методика расчета узла упругой подвески, который представляет собой горизонтальный маятник массой *m* с несущей пружиной жесткостью *C* и массовым корректором m_k (рис. 2). Схема горизонтального маятника с массовым корректором показана на рис. 2а, общий вид на рис. 2б. Масса маятника *m* представляет собой эквивалент одной четверти массы виброизолируемого объекта. Период колебаний горизонтального маятника с массовым корректором составит [3]:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{\chi_1 - m_k g R}},$$

где J – момент инерции массы маятника ($J = mL^2$), χ_1 – угловая жесткость упругой подвески ($\chi_1 = cl^2$).

Таким образом, узлы упругой подвески позволяют настраивать платформу для активной виброизоляции на требуемую массу объекта при помощи пружины с жесткостью *C* и резонансную частоту при помощи массового корректора с массой m_k [3].

Для исследования работы активного демпфера при резонансе были проведены измерения амплитуд виброперемещений виброизолируемого объекта и основания на разных частотах при нулевом управляющем токе. На основе полученных данных построен график зависимости КПАВ от частоты вибраций, создаваемых генератором сигналов в диапазоне от 10 до 200 Гц с шагом 5 Гц (рис. 3).

Следующим этапом исследования стало выявление эффективности снижения КПАВ при резонансной частоте демпфера за счёт подачи управляющего сигнала на демпфер в диапазоне от 0 до 1,2 А с шагом 0,05 А.

На основе полученных данных построен график зависимости КПАВ от величины управляющего тока (рис. 4). Из графика на рис. 3 видно, что эффективное снижение коэффициента передачи амплитуды виброперемещений активного демпфера более чем в пять раз происходит при подаче управляющего тока 1 А.

Дальнейшее уменьшение коэффициента передачи достигается за счет полностью замкнутого управления активным демпфером, при котором он работает как привод точного позиционирования. Для этого было проведено динамическое моделирование работы активного демпфера [4]. Была разработана структурная схема системы автоматического регулирования активного демпфера для режима активной виброизоляции в низкочастотном диапазоне при одновременном воздействии синусоидальных вибраций и ступенчатом управляющем сигнале при пошаговом перемещении демпфера на 5 мкм. Параметры воздействия: амплитуда колебаний основания демпфера 5 мкм, частота колебаний 4 Гц. В структурной схеме для обеспечения устойчивости и уменьшения времени переходных процессов использован ПИД-регулятор. Был получен переходный процесс САР активного демпфера. Время переходного процесса для погрешности позиционирования 0,25 мкм составляет 0,6 с. Коэффициент передачи амплитуды виброперемещений активного демпфера при этом составляет 0,02, что удовлетворяет требования к системам активной виброизоляции.

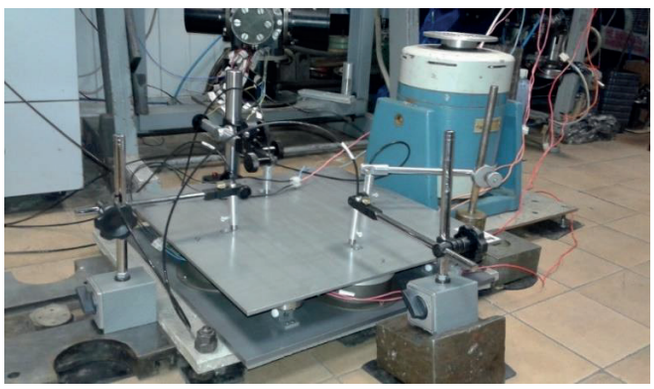
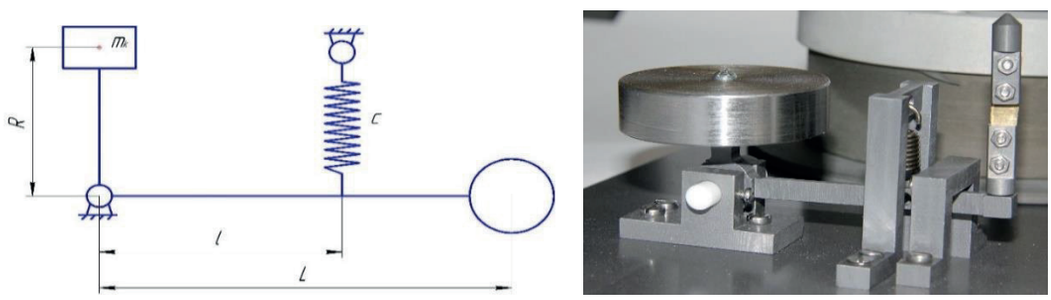


Рис. 1. Фотография экспериментального образца платформы для активной виброизоляции



а) б)

Рис. 2. Горизонтальный маятник с массовым корректором: а) схема; б) общий вид

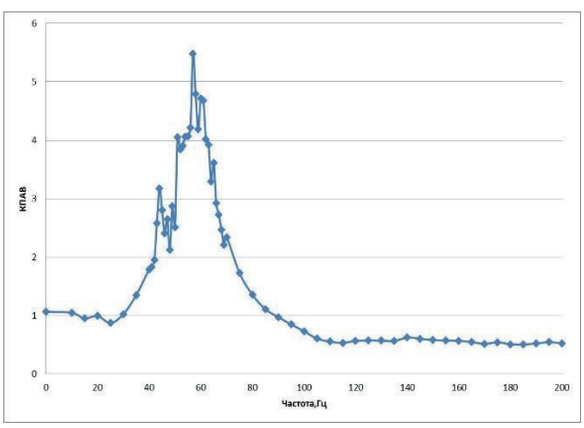


Рис. 3. Зависимость коэффициента передачи амплитуды виброперемещений (КПАВ) активного демпфера от частоты колебаний при нулевом управляющем токе

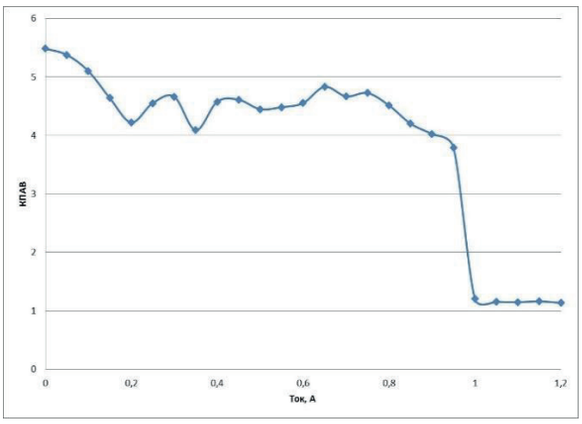


Рис. 4. Зависимость коэффициента передачи амплитуды виброперемещений (КПАВ) активного демпфера при резонансной частоте колебаний от управляющего тока

Литература

1. Управление активной виброизоляцией и позиционированием магнитореологических устройств / Михайлов В.П., Степанов Г.В., Базиненков А.М., Зобов И.К., Шаков К.Г // Нано- и микросистемная техника. 2011. N 7/ P. 5–9.
2. Mechanics and Physics of Precise Vacuum Mechanisms: FMIA Volume 91/ E.A. Deulin, V.P. Mikhailov, Y.V. Panfilov, R.A. Nevshupa / Series Editor R. Moreau, Springer, 2010. 234 p.
3. Виброзащитные системы с квазинулевой жесткостью / П.М. Алабужев, А.А. Гритчин, Л.И. Ким и др.; под ред. К.М. Рагульскиса. Л.: Машиностроение, Ленингр. 1986. 96 с.
4. *Михайлов В.П., Товмаченко Д.К., Базиненков А.М., Степанов Г.В.* Характеристики платформы для активной виброизоляции на основе магнитореологических эластомеров // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. № 12. С. 51–57.

УДК 338.1

Факторы развития высокотехнологичных отраслей в регионах России

Е.С. Перебойкина

Московский физико-технический институт (государственный университет)
Российская академия народного хозяйства и государственной службы
при Президенте Российской Федерации

В условиях социально-экономических изменений повышается роль передовых отраслей хозяйства. Высокотехнологичные виды деятельности (в работе под высокотехнологичными отраслями подразумеваются: высокотехнологичные и среднетехнологичные высокого уровня и наукоемкие) концентрируются в регионах с развитой инновационной системой, благоприятными условиями для привлечения кадров и т.д., поэтому требуется анализ региональных факторов развития этих отраслей. В условиях режима санкций, что также актуально, для современной России ограничен доступ к высоким технологиям. В то же время, несмотря на все возрастающую значимость высоких технологий, степень анализа проработанности проблем с ними связанных в отечественной литературе является недостаточной.

В исследовании на основании теоретической и эмпирической литературы выбираются факторы, которые влияют на развитие высокотехнологичных отраслей в регионах России. В работе зависимой переменой является производительность в хай-тек отраслях, которая рассчитывается как отношение объема продукции высокотехнологичных отраслей к численности работников в этих отраслях. На рис. 1 отражается производительность в высокотехнологичных отраслях в 2015 году. Более темному цвету соответствуют регионы с большей производительностью.

Объясняющие величины разделены на группы: человеческий капитал и факторы его привлечения, научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы и их финансирование, факторы размещения НЭГ (новой экономической географии), развитие предпринимательства, ИКТ и онлайн-услуг, а также выделяются контрольные переменные [1].

Строится эконометрическая модель вида

$$\ln(Vth_{it}) = \alpha + \beta_1 \ln(IRCHP_{it}) + \beta_2 \ln(Komf_{it}) + \beta_3 \ln(RD_{it}) + \beta_4 \ln(StartUp_{it-1}) + \beta_k \ln(X_{it}) + \varepsilon_{it}, \quad (1)$$

где Vth_{it} – производительность высокотехнологичных отраслей;
$IRCHP_{it}$ – индекс развития человеческого потенциала;
$Komf_{it}$ – средний индекс комфортности проживания
RD_{it} – внутренние затраты на НИОКР в ВРП;
$StartUp_{it-1}$ – число фирм в высокотехнологичных отраслях к экономически активному населению 1 год назад;
X_{it} – контрольные переменные (индекс риска, показатель укорененности и темп добычи полезных ископаемых);
i – индекс субъекта Российской федерации; *t* – индекс времени.

Построение модели осуществляется в программе gretl 1.10.2. Для построения функции используются 3 типа линейных моделей панельных данных [2]:

- объединённая модель (модель пула);
- модель с фиксированными эффектами;
- модель со случайными эффектами.

Итоговая модель выбирается на основании наибольшего числа параметров при переборе временных лагов факторов.

На основании модели можно сделать вывод, что для повышения производительности в высокотехнологичных отраслях в регионах России необходимо:

1. Повысить концентрацию человеческого капитала.
2. Способствовать увеличению инвестиций в НИОКР.
3. Создавать условия для развития предпринимательской активности.
4. Снижать риски для инвесторов.

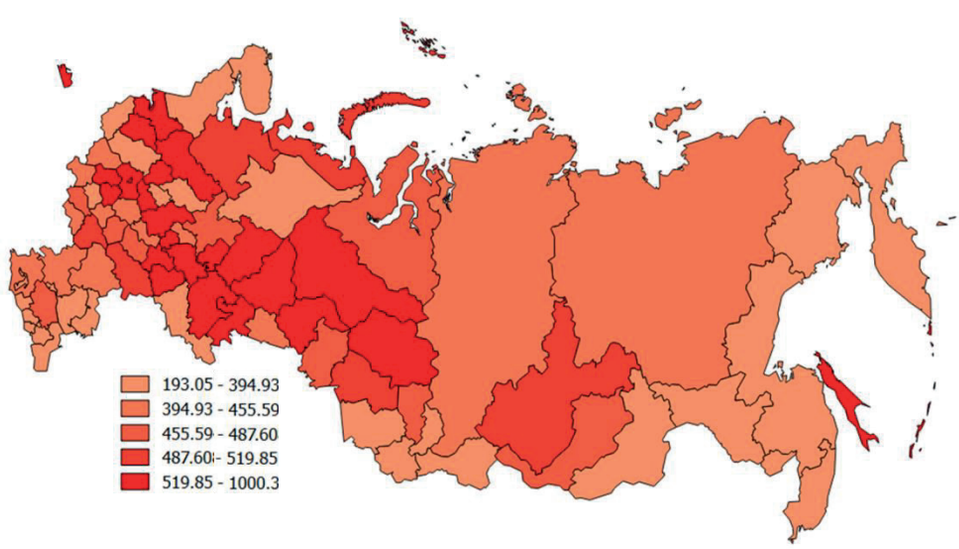


Рис. 1. Производительность в высокотехнологичных отраслях в 2015 г.

Таблица 1.

Регрессия для итоговой модели. *p<0,1; **p<0,05; ***p<0,01; в скобках указаны стандартные ошибки

Все переменные в логарифмах. Зависимая переменная: производительность высокотехнологичных отраслей, тыс. рублей. Регионов: 78, период наблюдения: 5 лет. Робастные стандартные ошибки	
Константа	6,23*** (1,05)
Индекс развития человеческого потенциала	2,5*** (0,61)
Затраты на НИОКР	0,05*** (0,02)
Стартап активность год назад	0,05* (0,03)
Индекс комфортности проживания	0,65*** (0,19)
Инвестиционный риск	–0,11** (0,05)
Полезные ископаемые	–0,04*** (0,02)
Возраст института	0,06 (0,21)
R^2	0,98
Критерий Акаике	–933
Критерий Шварца	–690

Литература

1. *Li S.* High tech spatial concentration: Human capital, agglomeration economies, location theories and creative cities, 2005.
2. *Носко В.П.* Эконометрика. Кн. 2. 2011.

УДК 004.007.62.51.001.8

Методический подход логистической поддержки проекта на основе языка SysML

А.А. Романов, Д.А. Шпотя

Московский физико-технический институт (государственный университет)

В условиях рыночной экономики и перехода на новый технологический уклад оставаться конкурентоспособным можно лишь в том случае, если получится производить востребованный результат того или иного проекта быстрее и дешевле, чем это делают остальные конкуренты. Этот тезис справедлив и для всей космической отрасли [1].

Для того чтобы производить дешевле и быстрее, требуется сверхточно определять, что хочет заказчик на самом деле, ради какой цели и под какие задачи необходимо разработать и создать то или иное изделие. Также необходимо понимать с инженерной точки зрения, что необходимо создавать и как это можно осуществить максимально эффективно (быстрее и дешевле). История развития космических аппаратов, к примеру успешное семейство пилотируемых КА «Союз», хорошо показывает, что, чтобы в условиях ограниченных ресурсов максимально эффективно достигать цели, нужно не изобретать каждый раз что-то глобально новое, а достигать поставленные цели за счет планомерного развития и улучшения предыдущего образца, т.е. аналога. Использование хорошо зарекомендовавших себя изделий повышает надежность и безопасность столь сложной техники. А это означает, что для успешного выполнения космических программ в рамках отечественной космической отрасли необходимо стремиться к сокращению номенклатуры выпускаемых изделий.

Унификация номенклатуры выпускаемой техники и ее составных частей подразумевает выполнение параллельной и не менее важной задачи по унификации процессов по ее созданию на каждой стадии жизненного цикла изделия (далее ЖЦИ). Именно в этом направлении было сосредоточено наше исследование к текущему моменту.

Нами были проанализированы инструменты системной инженерии и выбран определенный перечень. Эти инструменты мы распределили по стадиям ЖЦИ и создали методику разработки КА под названием «Усовершенствованное структурирование функции качества» (далее УСФК). УСФК прошла успешную верификацию и валидацию в проекте МКА «Маяк» [2]. Дальнейший поиск путей применения данного алгоритма в более крупных проектах показал, что УСФК может быть применен тогда, когда есть исходные данные, когда есть определенная потребность в результатах, которые может помочь сгенерировать УСФК, и когда проект небольшой. Большие проекты и создание техники по аналогии с прошлым образцом подразумевают прохождение определенного набора работ. Как правило, работы не фиксируются, а фиксируется результат в виде отчетного документа. Разные проектные команды могут приходить по-разному к одному и тому же результату, кто-то быстрее, кто-то дешевле, но дольше. В большом предприятии и при совместной работе разных команд над одним проектом без единого понимания что, как и кем создается вызывает массу издержек на разных этапах, что в свою очередь никак не способствует основной цели – выпускать изделия с меньшими затратами ресурсов и за более короткий временной интервал.

Чтобы приблизиться к указанной цели, мы начали по каждой стадии жизненного цикла изделия анализировать и унифицировать процессы и сопровождающие эти процессы нормативно-справочные материалы. В результате получилось создать, с помощью среды разработки MS Visio, базовые модели реализации процессов в нескольких стадиях ЖЦ-изделия. В текущем виде составленных моделей мы попытались представить, насколько это было возможно с помощью нотаций в данной среде разработки, последовательность (от англ. work-flow) выполнения процессов, но столкнулись с рядом ограничений. К этим ограничениям можно отнести такие важные аспекты, как отражение в модели параллельности выполнения процессов, участников процессов и т.д.

В мировой практике создания сложных моделей широкую популярность занимает язык архитектурного моделирования Systems Modelling Language (далее SysML) [1]. Создание моделей в средах разработки, поддерживающих нотации данного языка (Enterprise Architect, MagicDraw, Visual Paradigm, UModel, Rational Rhapsody), позволяют не только наглядно отразить в необходимой комплексности и разнообразии процессы на любой стадии жизненного цикла изделия, но также задавать процессам характеристики и в последующем выполнять цифровые тесты и симуляции.

Также стоит отметить, что разработанный нами ранее алгоритм УСФК, позволяющий максимизировать точность определения Голоса заказчика (требования к продукту) и Голоса инженера (инженерные характеристики, которые призваны обеспечить удовлетворение требований к продукту) благодаря результатам исследованиям на данный момент может быть в удобной и понятной форме (для лиц, принимающих решение) синхронизирован с процессами в соответствующей стадии и этапах ЖЦИ. Другими словами, получилось достичь понимание, как эффективно и планомерно внедрить в широкую практику инструменты системной инженерии, так чтобы они были в нужный момент разработки сложно, большого изделия всегда под рукой, а результат их применения приносил предприятиям отрасли пользу.

Таким образом, на данном этапе исследования мы сформировали фундамент - получили первые важные результаты. Эти результаты являются исходными данными (далее ИД) для дальнейшего развития нашего исследования по нескольким направлениям, а именно:

1. Применить язык архитектурного моделирования SysML на полученных на данном этапе ИД для создания усовершенствованных (более точных) моделей выполнения стадий ЖЦИ. Сначала мы усовершенствуем созданные на данный момент в среде разработки MS Visio модели некоторых стадий ЖЦИ, а в последующем создадим уже в нотациях языка SysML все остальные модели стадий ЖЦИ по заданному типу изделий.
2. Синхронизировать инструменты системной инженерии, представленные в алгоритме УСФК, с моделью соответствующей стадии ЖЦИ, выполненной в виде электронной модели в нотациях языка SysML.

3. Провести по первым двум пунктам верификацию и валидацию. В случае замечаний провести коррекцию.

4. В случае успеха пункта три провести дальнейшую разработку алгоритма УСФК (на данный момент алгоритм включает создание Дома качества №1) и синхронизировать его с последующими соответствующими стадиями ЖЦИ также отражённые в моделях с помощью языка SysML.

Мы ожидаем, что это направление исследования в конечном итоге позволит структурировать, оптимизировать и унифицировать процесс создания сложных изделий, что в свою очередь положительно повлияет на сокращение затрат ресурсов и времени на создание сложной космической техники.

Литература

1. *Романов А.А.* Смена парадигмы разработки инновационной продукции: от разрозненных НИОКР к цифровым проектам полного жизненного цикла // Научно-технический журнал «Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы». 2017. Т. 4, вып. 2. С. 68–84
2. *Романов А.А., Шпотя Д.А.* Инженерная методика определения важнейших инженерных характеристик изделия как основа для идентификации критических технологий // Труды МФТИ. 2016. Т. 9. N 3.

УДК 338.001.36

Сравнительный анализ экономической эффективности при транспортировке сжиженного природного газа и сжатого природного газа

П.А. Ярошенко

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Проведен сравнительный анализ стоимости транспортировки сжиженного природного газа и сжатого природного газа.

С началом транспортировки природного газа в форме СПГ (LNG) начали соблюдаться стандарты безопасности, надежности и защиты окружающей среды в процессах сжижения, регазификации, а также при транспортировке с использованием специально предназначенных танкеров. Инновации в технологической сфере привели к постепенному снижению издержек на всех этапах производственной цепочки. За счет растущей потребности в энергии и увеличивающегося потребления газа СПГ приобрел успех в качестве альтернативного источника. Однако сильная конкурентоспособность трубопроводного газа приводит к тому, что СПГ доступен для стран, не охваченных транспортной сетью трубопроводного газа. Основными инвестициями являются установки по сжижению (42%), танкеры для транспорта (30%) и заводы по регазификации (15%). Себестоимость единицы производства и транспортировки СПГ приведена в табл. 1.

Транспортировка природного газа в форме сжатого природного газа (CPG) представляет одну из самых первых альтернативных технологий, разработанную в прошлом.

В настоящее время сжатый природный газ на международном уровне признан альтернативным топливом с хорошей производительностью и низким уровнем выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

Процесс производства и транспортировки (рис. 1) достаточно прост и не требует заводов со специальными свойствами, за исключением достаточно большой мощности сжатия, которая тем не менее остается в рамках текущих технологических возможностей.

Таблица 1.

Себестоимость единицы производства и транспортировки СПГ

Стоимость за устье скважины (миллионы долларов за BTU* ккал)	Сжижение (миллионы долларов за BTU*)	Транспортировка (миллионы долларов за BTU*)	Регазификация и хранение (миллионы долларов за BTU*)
0.5–1.0	0.8–1.0	0.4–1.0	0.3–0.5

Рис. 1. Процесс производства и транспортировки сжатого природного газа

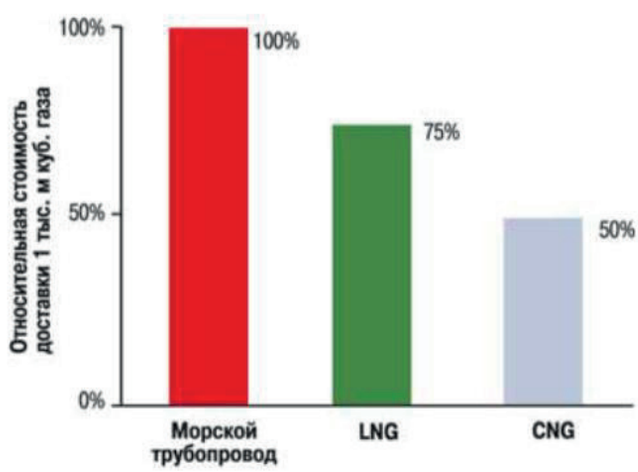


Рис. 2. Преимущество технологии CNG при объемах поставок природного от 0,5 до 4,0 млрд м куб в год на маршрутах протяженностью от 250 до 2500 мор. миль (оценка “Интари”)

Литература

1. *Roberto Bruschi* Encyclopedia of hydrocarbons// Istituto della enciclopedia Italiana fondata da Giovanni Treccani S.p.A. // V. 1. P. 859–878.
2. *Блинков А.Н., Власов А.А., Лицис А.В., Шурпяк В.К.* Научно-технический сборник // Российский морской регистр судоходства. 2007. Выпуск 30. С. 127–162.
3. *Блинков А.Н., Власов А.А., Лицис А.В*. Морская транспортировка сжатого газа // Морская биржа. 2006. Выпуск 83. С.82–87.

УДК 51-77

Модель принятия решений на основе теории рационального невнимания

Д.А. Егоров

Московский физико-технический институт (государственный университет)

В докладе рассматриваются основные аспекты теории рационального невнимания, а также изложена простая модель, описывающая принятие решения фирмой по установлению оптимальной цены на свой товар с учетом положения теории рационального невнимания.

В современном мире объем информации стремительно нарастает. Помимо традиционных источников информации (книги, газеты и журналы, телевидение и радио) активно внедряются электронные информационные ресурсы: интернет-издания, рассылки по электронной почте, объявления в социальных сетях и мессенджерах. В связи с активным распространением технологии контекстной рекламы и развитием рекомендательных систем все эти объявления достаточно часто несут в себе экономическую информацию, способную повлиять на решения и поведение экономических агентов (потребителей, фирм). Принятие этих решений потребителями и фирмами усложняется не столько недостатком, а сколько переизбытком поступающей информации.

При этом у человеческого организма существуют естественные (физиологические) ограничения на объем воспринимаемой им информации: возможности по отслеживанию и восприятию поступающей информации ограничены [1, с. 22]. Из-за этого возникает задача, как распределить ограниченные ресурсы внимания наилучшим образом.

Исследованием поведения экономических агентов с нескладывающимися на них ограничениями внимания занимается теория рационального невнимания [2, 3]. В данном докладе будет продемонстрирована модель поведения (принятия решений) экономических агентов в рамках теории рационального невнимания.

Первый ученый, предложивший ввести ограниченность ресурсов внимания в экономические модели принятия решений был, Кристофер Симс [2, 4]. Он предлагал воспринимать информацию как поток, а ограничения, накладываемые на объем воспринимаемой информации, как ограничения на входящий поток. Численной характеристикой потока информации он предлагал считать энтропию.

Используя предложенный энтропийный подход [5], человеческие ограничения, описывающие размер воспринимаемой информации, можно записать через отношение квадратов дисперсий полезного сигнала, σ_x^2, условной дисперсии полезного сигнала при наличии воспринимаемого сигнала, $\sigma_{x|s}^2$:

$$\frac{\sigma_x^2}{\sigma_{x|s}^2} \le 2^{2k}. \qquad (1)$$

Далее будет представлена простая одноперiодная модель принятия решения фирмой по установлению цены, действующей в рамках гипотезы рационального невнимания:

Допустим, что фирма устанавливает цену на свой товар в каждый момент времени, p; при этом она может отличаться от оптимального значения p^*, максимизирующего прибыль фирмы. Издержки при установлении цены, отличной от оптимальной, имеют квадратичную форму: $\frac{w}{2}(p - p^*)^2$. Пусть оптимальная для фирмы цена, позволяющая достичь максимального уровня прибыли, p_t^*, определяется следующим образом: $p^* = \phi x$, где x – полезный сигнал: случайная нормально распределенная величина с нулевым средним значением и дисперсией σ_x^2. ω и ϕ – постоянные параметры модели. Однако фирма воспринимает сигнал s: $s = x + \varepsilon$, состоящий из полезного сигнала x и шума ε - нормально распределенная случайная величина с дисперсией σ_x^2, не коррелированная с x.

Фирма выбирает количество внимания k ($k \geq 0$), которое она будет уделять наблюдению за переменной x. При этом затраты фирмы на выделение количества внимания k описываются показательной функцией вида: $\mu(2^k - 1)$, где $\mu > 0$ – постоянный параметр, характеризующий скорость увеличения затрат фирмы при росте количества внимания k. За основание степени взято число 2 для удобства. Так, предполагается, что затраты на выделение внимания растут экспоненциально при увеличении количества внимания k.

Задача минимизации издержек, решаемая фирмой в рамках гипотезы рационального невнимания, имеет вид

$$\min_{k \geq 0} \left\{ \frac{w}{2} E\left[(p_t - p_t^*)^2 \right] + \mu(2^k - 1) \right\}, \tag{2}$$

при ограничениях: (1), $p^* = \phi x$; $s = x + \varepsilon$; $p_t = E[p_t^* \mid s_t]$.

В результате решения задачи (2) оптимальное значение количества внимания, уделяемое на отслеживание переменной x:

$$k^* = \begin{cases} \frac{1}{3} \log_2 \left(\frac{w\varphi^2 \sigma_x^2}{\mu} \right), \text{если } \frac{w\varphi^2 \sigma_x^2}{\mu} \geq 1. \\ 0, \text{иначе} \end{cases} \tag{3}$$

Цена, устанавливаемая фирмой на свой товар:

$$p = \left(1 - 2^{-2k^*}\right) \phi(x + \varepsilon). \tag{4}$$

Выражение $\frac{w\phi^2 \sigma_x^2}{\mu}$ в (3) можно трактовать как отношение предельной полезности от обладания фирмой знаний о переменной x при $k = 0$ к параметру затрат, μ, прилагаемых на выделение внимания. Если это отношение равняется или превышает единицу, то фирма будет уделять внимание переменной x, иначе она будет игнорировать поступающий сигнал s. При этом чем больше издержки пересмотра цены w и чем больше дисперсия оптимальной цены (полезного сигнала) σ_x^2, тем больше внимания прикладывает фирма к отслеживанию переменной x.

В рамках написания кандидатской диссертации планируется разработка расширенной модели принятия решений экономическими агентами, учитывающей основные положения теории рационального невнимания. Данная модель будет полезна для регулирующих органов (Центральный Банк РФ, Министерство финансов, Министерство экономического развития) тем, что она может послужить опорой при принятии решении в области информационной политики. Она позволит ответить на вопросы: какую информацию предоставлять экономическим агентам, с какой периодичностью, при этом учитывая разнородность экономических агентов в России (группы профессиональных участников рынка, фирмы, потребители)?

Литература

1. *Канеман Д.* Думай медленно… решай быстро. М.: АСТ, 2017. 3336 с.
2. *Sims C. A.* Implications of rational inattention // Journal of monetary Economics. 2003. V. 50. N 3. P. 655–690.
3. *Mackowiak B.*, Wiederholt M. Optimal sticky prices under rational inattention // 2005 Meeting Papers «Society for Economic Dynamics». 2005. N 369. P. 3–89.
4. *Sims C. A.* Stickiness // Carnegie-Rochester Conference Series on Public Policy. 1998. V. 49. P. 317–356.
5. *Wiederholt M.* Rational inattention // The New Palgrave Dictionary of Economics. 2010.

УДК 629.7.08

Технические средства повышения безопасности логистических систем аэропортов

Н.Е. Константинова

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Рассматривается вопрос предоставления комплексной системы безопасности при перевозках воздушным транспортом: во-первых, досмотр посетителей в аэропортах, во-вторых, обеспечение безопасного полета до конечной точки.

Обязательному предполетному досмотру подлежат воздушное судно, его бортовые запасы, члены экипажа, пассажиры, багаж, в том числе вещи, находящиеся при пассажирах, а также грузы и почта [1]. Для досмотра пассажиров здания оборудуются КПП (контрольно-пропускной пункт), а также устанавливаются различные стационарные технические средства досмотра.

КПП оборудуются [2]:

- дверями входными взломостойкими, обладающими достаточной прочностью за счёт сплошного противовзломного лабиринта с надёжными запорами сложной разноуровневой системой запирания: механические замки разных типов.
- средствами связи и оповещения;
- аварийным освещением и электроснабжением;
- турникетами;
- системой видеонаблюдения и видеозаписи в реальном режиме времени;
- тревожной сигнализацией.

К стационарным техническим средствам досмотра относят [2]:

- рентгенотелевизионные интроскопы;
- стационарные металлоискатели;
- портативные (ручные) металлоискатели;
- средства обнаружения взрывчатых веществ;
- устройства радиационного контроля.

Воздушное судно во время подготовки к очередному рейсу или во время стоянок подлежит обязательному досмотру после высадки пассажиров или перед приемом на борт пассажиров, грузов и багажа. Предполетный досмотр проводится в соответствии с разработанной инструкцией с перечнями места досмотра по типам воздушных судов [3].

Литература

1. “Воздушный кодекс Российской Федерации” от 19.03.1997 N 60-ФЗ.
2. Несоленов Г.Ф., Титов Б.А. Система авиационной безопасности. Самара: Изд-во Самар, гос. аэрокосм, ун-та, 2011. 256 с.
3. Приказ Минтранса РФ от 28 ноября 2005 г. N 142 “Об утвержденни Федеральных авиационных правил “Требования авиационных правил безопасности к аэропортам”.

УДК 612.16

К вопросу выбора математической модели распространения пульсовой волны

А.А. Шинов, Л.Л. Попов

Московский физико-технический институт (государственный университет)

При сокращении сердца из левого желудочка через аортальный клапан выбрасывается порция крови. При этом возникает деформация стенок артерии, распространяющаяся вдоль неё, которая называется пульсовой волной (ПВ). Ещё врачи Древнего Востока методом пальпации пульса различали более сотни его характеристик и по этим параметрам могли судить о состоянии организма человека и ставить диагноз.

Современный уровень техники позволяет визуально наблюдать характер пульсовой волны и анализировать её математическими методами с помощью вычислительных устройств. Нами изготовлена приставка к стандартному сфигмоманометру, позволяющая визуализировать пульсовую волну [1, 2].

Одним из полезных показателей, получаемых из данных измерений ПВ, является скорость распространения пульсовой волны (СРПВ). Так как считается, что СРПВ хорошо коррелирует с жёсткостью стенок кровеносных сосудов [3], то этот параметр кардиологи относят к «золотому стандарту» (к нему относят, например, параметры, измеряемые in vivo, которые адекватны параметрам, измеряемым в корне аорты in vitro). В последнее десятилетие в медицинской практике считается, что только приборы SphygmoCor могут его обеспечить, а все остальные приборы в той или иной степени только приближаются к нему. По нашему мнению, для объективной оценки критерия СПРВ, получаемой различными приборами, необходима адекватная математическая модель ПВ. При этом следует учитывать, что такая модель должна быть достаточно проста для её реализации, а для получения дополнительной информации хотя бы первая производная кривой ПВ должна соответствовать таковой, получаемой при измерениях на пациентах.

Рассмотрим существующий уровень техники в данном вопросе. Самой распространённой на сегодняшний день моделью ПВ является модель Франка, предлагающая представить артерии в виде эластичного резервуара. В такой модели время систолы соответствует процессу расширения эластичного резервуара из-за сокращения сердца, а время диастолы — оттоку крови к периферии. Основным недостатком модели Франка является то, что моделируемая диастолическая составляющая не описывает реальную ПВ. Более близкая модель описана в [3]. Она представлена функцией трёх переменных вида $V = A\mathrm{e}^{-\alpha t}\sin\left(\omega t\right)$, где V – СРПВ, t – текущее время, а параметры A, α и ω находятся исследовательским прибором, то есть экспериментально. В данном случае предлагается к «известной» первой производной функции подобрать недостающие коэффициенты. Однако в работе [3] не представлена сама используемая функция, следовательно, не ясно, как получена производная. В [4, 5] предлагается модель гармонического осциллятора, при этом степень приближения к СПРВ определяется достаточно большим количеством гармоник:

$$P_{PW}\left(t\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\left(\frac{1}{\left(t\sigma_{DPW}\right)}\exp\left(-\frac{\left(\ln(\mathrm{t}) - \mu_{DPW}\right)^2}{2\sigma^2{}_{DPW}}\right) + \frac{1}{\left(t\sigma_{RPW}\right)}\exp\left(-\frac{\left(\ln(t) - \mu_{RPW}\right)^2}{2\sigma_{RPW}{}^2}\right)\right) \qquad (1)$$

В данной работе предлагается логнормальная модель ПВ, которая основывается на следующих представлениях: ПВ является составной и содержит прямую и обратную компоненты; прямая компонента моделируется логнормальной функцией; обратная компонента ПВ моделируется логнормальной функцией, в первом приближении такой же формы, но меньшей амплитуды, которая зависит от жесткости аорты.

Таким образом, ПВ в рамках такой модели может быть представлена в виде уравнения (1), где P_{PW} —давление, t — текущее время, μ_{DPW} и σ_{DPW} – параметры прямой компоненты, а μ_{RPW} и σ_{RPW} – параметры обратной компоненты. Преимуществом данной модели можно назвать то, что качественно моделируется не только форма ПВ, но и форма её производных. В отличие от, например, модели Франка, где уже первая производная совсем не схожа с реальными данными.

Литература

1. *Попов Л.Л., Шинов А.А.* Корреляция критериев, полученных методом сфигмографии, путём визуализации пульсовой волны с физиологическими параметрами // 59 научная конференция МФТИ. 2016.
2. *Лобачев В.В., Попов Л.Л., Самосадная И.Л., Шинов А.А.* Оценка состояния кровеносной системы человека методом визуализации пульсовой волны // Сборник материалов конференции с международным участием «Научно-методические проблемы нормальной физиологии и медицинской физики». 2017. С. 79–80.
3. *Акулов В.А.* Модель пульсовой волны и её реализация в среде Excel // Труды Третьей

Всероссийской научной конференции. Часть 4, Математические модели в информационных технологиях, Матем. моделирование и краевые задачи, СамГТУ. 2006. С. 13–16.
4. *Михайлов Н.Ю*. Программный комплекс имитационного моделирования сигнала пульсовой волны: диссертация на степень к.т.н.: 05.13.18: Ростов-на-Дону, 2004 162 с. РГБ ОД, 61:04-5/1894.
5. *Михайлов Н.Ю., Толмачев Г.Н.* Математическая модель пульсовой волны // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. Приложение. 2003. № 6. С. 3–9.

УДК 658.5

Управление жизненным циклом сложных технических изделий. Роль единой модели данных в системах управления жизненным циклом

А.П. Расквас

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Жизненный цикл сложных технических изделий состоит из нескольких стадий: формирование концепции, затем производство и эксплуатация, поддержка работоспособности изделия в процессе эксплуатации, и конечная стадия – вывод из обращения [1]. На каждой стадии возникает ряд проблем, таких как низкое качество продукции и низкая производительность, большие сроки вывода изделия на продажу, высокие расходы на разработку и вывод на рынок, некачественное послепродажное обслуживание. Эти проблемы не позволяют производителю добиться конкурентоспособности изделия на рынке высокотехнологичной продукции [2, 3]. Для комплексного решения задачи повышения конкурентоспособности сложных изделий применяется методология управления жизненным циклом (УЖЦ).

УЖЦ позволяет контролировать сложные процессы и эффективно координировать участников между собой на всех стадиях и этапах жизненного цикла изделия. Методология УЖЦ является комплексной, она включает в себя методы системной инженерии, управления программами и проектами, интегрированной логистической поддержки (ИЛП), управления сервис-ориентированными контрактами. Система управления жизненным циклом (СУЖЦ) изделия обеспечивает управление конфигурацией и стоимостью изделия, создание для него эффективной системы технического обслуживания и материально-технического обеспечения с учетом требований по значению коэффициента технической готовности [4].

Одной из главных составляющих СУЖЦ является информационная поддержка изделий (ИПИ). Дело в том, что добиться значимых результатов при управлении жизненным циклом изделия можно только в том случае, если все организации – участницы жизненного цикла будут обмениваться оперативной и достоверной информацией об изделии на протяжении всех стадий и этапов жизненного цикла. А для этого необходимо создать единое хранилище информации об изделии и единую модель данных изделия.

Единая модель данных является универсальным языком описания изделия, которая позволяет организовать обмен информацией между участниками жизненного цикла, независимо от того, какими прикладными программными продуктами пользуются эти участники [5].

За рубежом в последние двадцать лет активно ведутся разработки методологических основ концепции УЖЦ. В частности, Министерство обороны Великобритании финансировало работы по созданию серии стандартов DEF STAN 00-60 «Integrated Logistic Support», Министерство обороны США – работы по созданию стандартов STEP (серия ИСО 10303), Европейская ассоциация производителей авиационной техники активно ведет разработку стандартов серии ASD. Центральным элементом всех этих стандартов является универсальная модель данных изделия, независимая от конкретных компьютерных технологий и программных платформ.

Российской промышленности необходимо разработать собственные стандарты управления жизненным циклом и собственную модель данных, адаптированные к нашей специфике разработки, производства и эксплуатации сложных технических изделий, соответствующие нашему законодательству и обеспечивающие преемственность нормативно-технических документов. Задача разработки таких стандартов становится особенно актуальной в силу современной политической обстановки и новой политики государства – импортозамещения.

Оптимизировав процесс разработки изделий, управляя рисками, используя единое защищенное хранилище данных и единую модель данных изделия, можно создавать изделия высокого качества, при этом снизив свои затраты и повысив конкурентоспособность этих изделий.

Литература

1. *Яблочников Е.И., Фомина Ю.Н., Саломатина А.А., Гусельников В.С.* Методы управления жизненным циклом приборов и систем в расширенных предприятиях: учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. 149 с.
2. *Суханов А.А., Рязанцев О.Н., Артизов С.А., Бриндиков А.Н., Незаленов Н.И., Карташев А.В., Елизаров П.М., Судов Е.В.* Концепция развития ИПИ-технологий для продукции военного назначения, поставляемой на экспорт – М.: НИЦ CALS «Прикладная логистика» , 2013. 41 с.
3. *Батоврин В.К., Бахтурин Д.А.* Управление жизненным циклом технических систем: серия докладов (зеленых книг) в рамках проекта «Промышленный и технологический форсайт Российской Федерации» / В.К. Батоврин, Д.А. Бахтурин; ред. И.С. Мацкевич, М.С. Липецкая; Фонд «Центр стратегических разработок «Северо-Запад» (Серия докладов в рамках проекта «Промышленный и технологический форсайт Российской Федерации») СПб, 2012. Вып. 1. 59 с.
4. *Левин А.И., Судов Е.В.* Интегрированная логистическая поддержка наукоемких изделий. // Министерство промышленности, науки и технологий Российской Федерации. М: 2002. 70 с.
5. ГОСТ Р ИСО 10303-1-99. Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 1. Общие представления и основополагающие принципы. 1999.

УДК 004.414.22

Разработка концепции и прототипа платформы управления цифровыми сервисами

А.В. Бахчиев

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Работа была направлена на решение актуальных задач телекоммуникационной и строительной отраслей. Так, в определении цели и задач работы принимали участие сотрудники Департамента системной интеграции ПАО «ВымпелКом» и Дирекции по инновациям ГК «Мортон».

Целью работы являлась разработка концепции и прототипа платформы управления цифровыми сервисами, пользователями которых были бы жители новых микрорайонов Москвы и Московской области. Новизна данного направления исследований состоит в применении интеллектуального анализа пользовательских профилей и предсказания потребностей пользователей на основе данных, собираемых отдельными сервисами. Следствием такого подхода является экономия ресурсов и уменьшение количества рутинных действий, выполняемых жителями в быту.

Задачи формулировались согласно принципам системной инженерии [1] – составление реестра заинтересованных сторон, определение их потребностей, определение требований к функциональности платформы, разработка концепции, разработка архитектуры прототипа, разработка и тестирование прототипа [2].

В качестве заинтересованных сторон были выделены следующие, наиболее приоритетные:

1. Застройщики. Интерес – рост привлекательности продаваемой недвижимости в глазах покупателей. При росте стоимости недвижимости на 1–3% в связи с вложениями в платформу и оборудование добиться заметных для покупателей отличий на рынке недвижимости.
2. Управляющие организации, выступающие эксплуатантами платформы. Заинтересованы в получении доли доходов от оказываемых сервисов и обслуживания оборудования.
3. Партнеры – поставщики сервисов. Интерес – продажа крупной партии оборудования и будущие доходы от его обслуживания.
4. Покупатели недвижимости как потребители сервисов. Заинтересованы в обеспечении безопасности своей недвижимости, экономичности и комфорте. Готовы оплачивать соответствующие сервисы, покрывая операционные издержки.

Для анализа потребностей конечных пользователей – покупателей недвижимости проведен опрос 12 000 жителей районов Москвы и Московской области. В результате сформирован список наиболее востребованных цифровых сервисов, необходимых для удовлетворения потребностей конечных пользователей:

1. Онлайн-трансляция с видеокамер во дворе.
2. Безлимитный Wi-Fi во дворе.
3. Заказ сервисов управляющей организации из приложения.
4. Видеодомофон с входом по смартфону.
5. «Умный дом» (беспроводные счетчики, освещение, сигнализация).
6. Управление шлагбаумами со смартфона.

На основании этих требований к функциональности была зафиксирована концепция платформы управления цифровыми сервисами и разработана верхнеуровневая архитектура прототипа.

Разработанный на основе данной архитектуры прототип состоит из следующих компонент:

1. Приложение, позволяющее жителям управлять отдельными сервисами из единого интерфейса.
2. Программная платформа для интеграции с программным обеспечением партнеров.
3. Оборудование, используемое сервисами, поставляемое партнерами и устанавливаемое до продажи недвижимости.

Прототип платформы был разработан с использованием общедоступного инструментария класса PaaS. Был протестирован интерфейс между цифровым сервисом и платформой. В настоящее время проводится дальнейшее тестирование интерфейсов между компонентами платформы.

Таким образом, был выполнен спектр задач по разработке концепции и прототипа платформы управления цифровыми сервисами.

1. Составлен реестр заинтересованных сторон.
2. Определены потребности заинтересованных сторон.
3. Определены требования к функциональности платформы.
4. Разработана концепция платформы.
5. Разработана архитектура прототипа платформы.
6. Разработан прототип платформы.
7. Проведено тестирование прототипа платформы.

Результаты тестирования указывают на высокие шансы прототипа пройти этап верификации. Дальнейшая работа будет посвящена валидации прототипа платформы.

Работа поддержана Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

Литература

1. *Косяков А.* [*и др.*]. Системная инженерия. Принципы и практика. М.: ДМК Пресс, 2014. 624 с.
2. ГОСТ Р ИСО/МЭК 15288-2005 Информационная технология. Системная инженерия. Процессы жизненного цикла систем.
3. ISO/IEC/IEEE 42010:2011 Systems and software engineering – Architecture description.

УДК: 004.912+81'322.2

Подходы к определению соответствия текста его заголовку.

Е.С. Максимов

Московский физико-технический институт (государственный университет)
ИСА ФИЦ ИУ РАН

Вокруг нас очень много информации. Информацию мы получаем каждый день из разных источников. Очень много знаний приходит из интернета, где, вообще говоря, далеко не все источники проверяются и модерируются. Как следствие, получается, что далеко не вся информация является достоверной. При поиске люди часто обращают внимание на громкие заголовки статей, за которыми часто скрывается информация, не столь интересная читателю. Кроме того, под такими заголовками часто скрывается реклама продукции сомнительного качества, использование которой может нанести ущерб здоровью и даже жизни.

Поэтому важной задачей для обеспечения безопасности является автоматический поиск и фильтрация подобной информации. Данная задача относится к областям обработки естественных языков и компьютерной лингвистики и находится на стыке проблем сентимент-анализа и тематического моделирования.

Очень важным вопросом в данном случае является правильная постановка задачи и выбор метрики, по которой следует оценивать полученный результат. В соревновании FakeNewsChallenge организаторы предложили для данной задачи метрику, которая оценивает как точность соответствия темы статьи теме заголовка, так и различия эмоционального окраса для них [1]. Для достижения лучшего результата было предложено разделить данные задачи на 2 независимые и настраивать 2 классификатора на решение более узкого класса задач, что позволило существенно улучшить результат.

Существует большое количество различных подходов к данной проблеме – как классических, так и современных. Различные подходы обладают своими достоинствами и недостатками. Большинство существующих методов хорошо работают в случае использования для английского языка, который является довольно простым. Для более сложных языков лучше применять методы, которые учитывают синтаксис в различных языках [2, 3]. Был проведен сравнительный анализ методов для решения описанной задачи.

Хотя использование методов автоматической обработки текстов и позволяет сильно облегчить по поиску несоответствий текста и заголовка статьи, создать классификатор, который превосходит уровень человека в решении данной задачи, пока сложно. Осложняется данная задача еще и тем, что количество слов в заголовке статьи мало, что создает трудности с обработкой.

Литература

1. *Pomerleau D., Rao D.* Fake News Challenge competition. URL: http://www.fakenewschallenge.org/.
2. *Bojanowski P., Grave E., Joulin A., Mikolov T.*, Enriching Word Vectors with Subword Information. arXiv preprint arXiv:1607.04606, 2016.
3. *Bojanowski P., Grave E., Joulin A., Mikolov T.*, Bag of Tricks for Efficient Text Classification. arXiv preprint arXiv:1607.01759, 2016.

UDC 544.558

Surface Modification of Chitosan by Cold-Plasma

A. Pardo, E. Garcia and T. Vasilieva

Moscow Institute of Physics and Technology (State University)

Find alternatives of biocompatible and biofunctional materials is of primary interest. Chitosan has beneficial properties, such as non-toxicity, biodegradability, biocompatibility, and

antifungal activity, all of these are appropriate for biomedical applications. Chitosan is a bioactive polymer which contains a large number of hydroxy and amino groups, because of these two functional groups, chitosan has been either alone or could be capable of deriving or grafting desirable bioactive groups. For this reason it is sought to chemically modify chitosan to create new biofunctional materials, since the products created do not alter the fundamental skeleton of chitosan and the introduced group retains its original physicochemical and biochemical properties. [1-6]

Surface modification of polymers is a technique to improve physicochemical polymers properties.[3, 5] One of the most interesting modification methods is plasma treatment. Usually plasma activation increases polymer surface energy and improves adhesive properties by the incorporation of certain functional groups. The degree (efficiency) of surface modification during plasma processes depends on the density of active species, plasma power and exposure time. [1]

In previous studies work has been done on the surface modification of Chitosan by plasma. Chang et al (2013) showed how the plasma-modified chitosan film had a much rougher surface and more protuberances on it. These characteristics also contributed to the increase in hydrophilicity and increased swelling property of the plasma-modified chitosan film. In addition, the biodegradability of the chitosan film could be increased.

On the other hand, Dorraki et al. (2015) treated the Chitosan by atmospheric dielectric barrier discharge (DBD) plasma of atmospheric pressure which led to superficial physico-chemical modifications due to the interactions between the surface of the polymer and the reactive species in the plasma. They obtained a roughness increase that provides a longer surface area for better wettability and stronger interfacial bonding.

Similarly, Yu-Chun Wu et al (2012) were able to show that it increases the roughness of the chitosan surface and improves other properties by plasma, without changing its chemical structure.

Amino acid grafted chitosans

A large variety of chitosan derivatives have been proposed, however, few have been established for direct application. Amino acid grafted chitosans possess a great potential for applications like biomaterials with an ability to simulate and initiate biomimetic processes useful especially in the areas of drug delivery and tissue engineering, is an exciting prospect [8].

It is possible to use infrared spectroscopy to observe the formation of new bonds and chromatographic separation techniques such as capillary electrophoresis for the quantification of bound amino acids

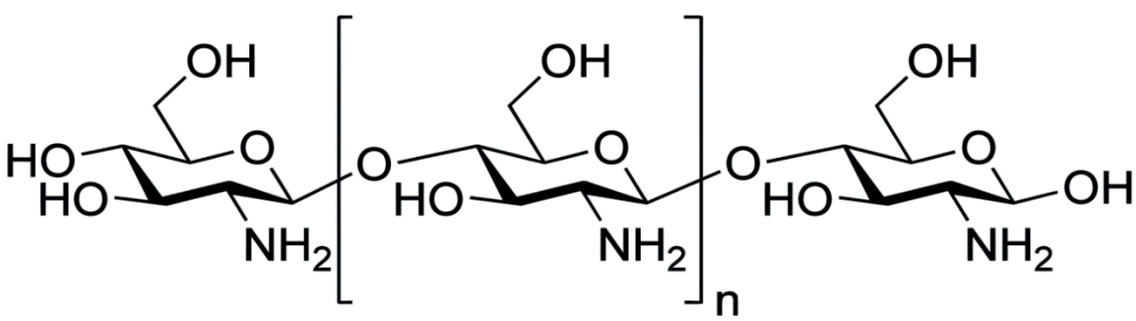


Fig. 1: Chitosan: bioactive polymer with 2-acetamido-2-deoxy-β-D-glucopyranose (GlcNac) and 2-amino-2-deoxy-β-D-glucopyranose (GlcN)

References

1. *Wiącek A.E.* [*et al.*]. Low-temperature air plasma modification of chitosan-coated PEEK biomaterials // Polymer Testing. 2016. V. 50. P. 325–334.
2. *Chang S-H. and Chian C-H.* Plasma surface modification effects on biodegradability and protein adsorption properties of chitosan films // Applied Surface Science. 2013. V. 282. P. 735–740.
3. *Dorraki N.* Surface modification of chitosan/PEO nanofibers by air dielectric barrier discharge plasma for acetylcholinesterase immobilization // Applied Surface Science. 2015. V. 349. P. 940–947.

4. *Ma F.* [*et al.*]. Effect of solution plasma process with bubbling gas on physicochemical properties of chitosan // International Journal of Biological Macromolecules. 2017. V. 98, P. 201–207.
5. *Maslakci N.N, Ulusoy S., Oksuz A.U.* Investigation of the effects of plasma-treated chitosan electrospun fibers onto biofilm formation // Sensors and Actuators B: Chemical. 2017. V. 246. P. 887–895.
6. *Chokradjaroen C.* [*et al.*]. Enhanced degradation of chitosan by applying plasma treatment in combination with oxidizing agents for potential use as an anticancer agent // Carbohydrate Polymers. 2017. V. 167. P. 1–11.
7. *Wu Y-C.* [*et al.*]. Argon-Plasma-Treated Chitosan: Surface Characterization and Initial Attachment of Osteoblasts // Journal of Biomaterials Science 2010. Polymer Edition 21:5. P. 563–579.
8. *Casettari L.,* [*et al.*]. Biomedical applications of amino acid-modified chitosans: A review // Biomaterials. 2012. V. 33. P.7565–7583.

УДК 504.064.36

Геоинформационные системы поддержки логистической деятельности в газовой и нефтяной областях

А.Р. Салихова

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Геоинформационная система (ГИС) а представляет собой компьютерную систему, отражающую данные на электронной карте. ГИС используют во многих отраслях промышленности. Её преимуществом является наглядность представления пространственных данных на карте и широкие возможности их детального анализа.

Для транспортировки нефти и газа по магистральным трубопроводам необходимо обеспечить надежность работы трубопроводных систем. При возникновении внештатных ситуаций на объектах нефтегазовой области можно нанести непоправимый вред окружающей среде, большой экономический ущерб из-за потерь продукта и нарушения производства в смежных областях.

Для получения полной информации о трубопроводных системах сейчас всё чаще используют аэрокосмические методы. Аэро- и космосъемка местности позволяет одновременно контролировать загрязнение окружающей среды и техническое состояние объектов. Данные мониторинга позволяют быстро выявлять и точно определять местоположение аварий на нефте- и газопроводах.

Аэро- и космосъемку достаточно часто использую для:

1) обнаружения дефектов технических объектов (трещин, разрывов и т.д.);
2) мониторинга состояния окружающей среды вдоль трубопроводов, выявления областей загрязнений;
3) изучения движений земной коры, их влияния на технические объекты и магистрали;
4) определения карт грунтов;
5) изучения экзогенных процессов;
6) ранжирования участков диагностических исследований.

Потребность в легких, компактных летательных аппаратах, обладающих высокими характеристиками маневренности и способных выполнять широкий круг задач, послужила стимулом к развитию беспилотной авиации во всем мире. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) могут успешно выполнять не только военные задачи, но и задачи гражданского назначения.

Применение БПЛА для разведки местности обусловлено недостатками традиционных способов получения данных: с помощью космических спутников (космическая съемка) и воздушных пилотируемых аппаратов (аэрофотосъемка).

Снимки со спутника имеют максимальное разрешение 0,5 м, довольно часто этого недостаточно для крупномасштабного картирования. Кроме того, хорошие погодные условия являются необходимым условием получения снимков высокого качества. Оперативность получения данных при этом уменьшается.

Применение традиционных комплексов для аэрофотосъемки невыгодно в следующих случаях:

1. Съемка небольших объектов и малых по площади территорий. В этом случае экономические и временные затраты на организацию работ, приходящиеся на единицу отснятой площади, существенно превосходят аналогичные показатели при съемке больших площадей (тем более для объектов, значительно удаленных от аэродрома);

2. При необходимости проведения регулярной съемки в целях мониторинга протяженных объектов: трубопроводы, ЛЭП, транспортные магистрали.

Таким образом, плюсами применения БПЛА являются:

1) эффективность;
2) возможность съемки с небольших высот и вблизи объектов. Получение снимков высокого разрешения;
3) быстрота получения снимков;
4) возможность применения в зонах чрезвычайных ситуаций без риска для жизни и здоровья пилотов.

Основным преимуществом использования БПЛА является минимизация человеческих рисков и исключение возможности угрозы жизни человека. К прочим достоинствам использования беспилотного летательного аппарата можно отнести: уменьшение стоимости производства работ и меньшее количество регламентных операций по сравнению с пилотируемой техникой, отсутствие необходимости в высококвалифицированной технической помощи при обслуживании, обеспечение безопасности на объекте работ, а в случае использования БПЛА многократного действия необходимо отметить и значительный срок эксплуатации беспилотного летательного аппарата.

Литература

1. *Цветков В.Я*. Геоинформационные системы и технологии. М.: Финансы и статистика, 1998.
2. *Майкл Н. ДеМерс.* Географические информационные системы. Основы. М.: Дата+, 1999.
3. *Иванова И.А, Никонов В.В., Царева А.А*. Способы организации управления беспилотными летательными аппаратами // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2014. Выпуск №11-1. С. 56–63.

УДК 33.338

Учёт влияния каннибализации при прогнозировании спроса на товар

Я.А. Реутт, Е.А. Старостин

Московский физико-технический институт (государственный университет)

При вводе нового продукта, особенно под известным брендом, производителю довольно естественно предполагать о росте общей прибыли в результате дополнительных продаж. Но что если новоявленный товар успешен за счёт других товаров этого же производителя? Процесс, в котором продукт компании получает продажи, долю рынка или прибыль, отводя их от прочих продуктов той же компании, называется каннибализацией.

В большинстве случаев каннибализация оказывает негативное влияние на общую прибыль и финансовое благосостояние компании. По этой причине возможность построения прогноза с учётом данного феномена играет немаловажную роль при принятии решений в области маркетинга. Стоит заметить, что каннибализация воздействует на прибыль не только производителей, но и на розничных продавцов. Для ритейла, имеющего в ассортименте десятки тысяч позиций, управление поставками и поддержание запасов на необходимом уровне является сложнейшей логистической задачей. Грамотное управление запасами и правильные прогнозы способны экономить предприятию огромные средства. Если не учитывать при прогнозировании канибализацию, сильно влияющую на реальную динамику продаж, то в результате останутся «замороженные» средства в виде складских остатков.

Источники возникновения каннибализации могут быть следующие:

1) Ввод на рынок нового продукта, имеющего свойства, схожие с другими продуктами, присутствующими в продаже. Под нововведением также можно подразумевать старый товар, но в новой упаковке, отличающуюся от прочих размером или материалом.
2) Изменения в цене продукта. Причиной изменений могут быть как логистические или маркетинговые изменения, так и проведение специальных акций.
3) Повышение спроса на определённый продукт. Возникнуть такая ситуация может из-за сезонности, праздников или рекламных кампаний.

В каждом из случаев влияние каннибализации на продажи присутствует, но выявить конкретные изменения является нетривиальной задачей. Существуют методы, которые учитывают динамику рынка и позволяют идентифицировать каннибализацию, например:

1) Анализ потерь прибыли.
2) Дублирование таблиц покупки.
3) Анализ отклонений от ожидаемых долей покупок.

Цель данной работы состоит в сравнении указанных выше методов определения каннибализации, построение модели прогнозирования на основе полученных данных и выборе наиболее подходящего для использованной выборки. Оценка будет производиться на основе точности прогноза с учётом эффектов каннибализации.

Литература

1. *Wendy Lomax*. The measurement of cannibalization, Marketing Intelligence & Planning. 1996. V. 14 Issue: 7. P. 20–28.
2. *Sundara Ragharan Srinivasan*, *Sreeram Ramakrishnan*, *Scott E. Grasman*. "Incorporating cannibalization models into demand forecasting", Marketing Intelligence & Planning. 2005. V. 23. Issue: 5. P. 470–485.

УДК 330.42

Экономическая оценка спасательных операций

Д.С. Марков

Московский физико-технический институт (государственный университет)

На сегодняшний день большинство спасательных операций, проводимых на территории Российской Федерации, имеют чёткую систему оценивания рисков. Под рисками, как правило, понимают совокупность вероятности возникновения неблагоприятного события и ущерб, который оно влечёт. Задачей данной системы является минимизация данного риска за счёт создания необходимых условий, при которых снижается вероятность возникновения неблагоприятного события. При возникновении нештатных ситуаций или ошибке работы системы чаще всего не удаётся избежать ущерба [1].

Спасательные операции разделяют на несколько классов в соответствии с целями проводимой операции. Каждый класс подразумевает использование определённых аварийно-технических средств и инструкций для личного состава [5]. Говоря об экономической оценке спасательных операций, стоит брать в расчёт не только риск и ущерб, но и количество средств и личного состава, используемых для устранения аварийной ситуации. Оценивая величину затрат на использование специализированной техники, привлечения экспертов и компенсации, стоит также учитывать вероятность возникновения будущего ущерба от аварии и стоимость восстановления территории или организации, понёсшей данный ущерб.

Сложнее обстоит ситуация с моделированием рисков в экстремальных условиях. Одним из регионов, подходящим под это описание, можно назвать арктический шельф. Программа развития арктической части России, рассчитывает модернизацию существующих там производственных объектов, а также оптимизацию системы безопасности жизнедеятельности, транспорта и производства [2]. Отсутствие статистики в

области борьбы с аварийными ситуациями в подобных условиях снижает эффективность применения традиционных моделей оценки рисков и делает многие из этих моделей неприменимыми. Использование усреднённых показателей в моделях может привести к тому, что будет решена несуществующая задача. Одним из возможных выходов в данном случае является использование моделей с нечёткой логикой, способных работать в условиях малого количества данных. Применение подобных моделей может помочь приблизительно оценить ущерб и стоимость спасательной операции, а также выявить возможные последствия [3, 4].

Необходимо создать гибкую систему оценки ущерба и вероятности аварийной ситуации, которая могла бы учитывать результаты оценки данных параметров, полученных другими системами, и сопоставляла бы их с реальной статистикой. Создание диапазона разброса оценённого ущерба от реального снизит вероятность возникновения ситуации, когда средств, выделенных на спасательную операцию, может не хватить на устранение аварии и ликвидацию её последствий.

Литература

1. *Vichova Katerina, Hromada Martin, Rehak David*. The Use of Crisis Management Information Systems In Rescue Operations of Fire Rescue Service of the Czech Republic // Procedia Engineering. 2017. V. 192. P. 947–952.
2. *Авдотьин В., Горемыкина Г.* Моделирование системы управления резервом аварийно-спасательного оборудования и снаряжение для проведения крупномасштабных поисково-спасательных операций в арктической зоне Российской Федерации // Риск: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. 2015. № 4. С. 260–268.
3. *Башкин В.Н, Трубицина О.П.* Модель управления геоэкологическим риском кислотных выпадений в зонах влияния объектов нефтегазовой промышленности Российской Арктики // Сборник материалов научно-практической конференции Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова «Моделирование природных и техногенных чрезвычайных ситуаций и рисков их возникновения: синтез достижения технических и социальных наук». 2016. С. 14–16.
4. *Коврижных В.Н, Митько А.В.* Основные направления мониторинга нефтеразливов в Арктическом регионе // Сборник материалов научно-практической конференции Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова «Моделирование природных и техногенных чрезвычайных ситуаций и рисков их возникновения: синтез достижения технических и социальных наук». 2016. С. 29–33.
5. ГОСТ Р 22.9.22-2014. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Аварийно-спасательные средства. Классификация.

УДК 004.942

Прогнозирование кризисных явлений в экономике на основе сигналов в Интернете в технике МГУА

А.В. Болдырева

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Аннотация. В работе предлагается технология обработки сигналов Интернета, которая позволяет дать прогноз макроэкономических параметров, связанных с кризисными явлениями в экономике. В качестве сигналов Интернета рассматриваются запросы в поисковые машины и упоминания на веб страницах. Предложенная технология состоит: (1) в использовании новых алгоритмов больших данных, для сокращения и группировки временных рядов; (2) в настройке алгоритмов индуктивного моделирования для отбора прогнозных моделей оптимальной сложности. В экспериментах используются данные США и России. Полученные результаты превосходят по точности традиционные авторегрессионные модели, и близки или превосходят прогнозы экспертов Bloomberg и Moody’s.

Актуальность. Исследователи разных стран анализируют периоды рецессии в мировой экономике, чтобы ответить на вопрос, можно ли было предусмотреть наступление кризисных явлений, предотвратить и/или предупредить их. Консенсус на данный момент не достигнут, и не всегда есть согласие между учеными, экономистами и политиками в определении периодов, именуемых как *кризис*. Своевременное получение информации о текущих трендах социально-экономической жизни страны определяет результативность стратегического планирования в экономике и денежно-кредитной политики государства в краткосрочной и долгосрочной перспективе. Несмотря на возрастающую активность аналитиков всего мира в применении нестандартных методов прогнозирования, и, прежде всего, с использованием данных Интернета, исследования сосредоточены на анализе единичных объясняющих переменных. В данной работе предпринята попытка масштабного использования большой базы динамики сигналов Интернета для прогнозирования ключевых показателей экономики двух стран – США и России.

Преимущества. Сигналы Интернета высвечивают скрытые процессы экономической активности пользователей сети, чьи ожидания можно выявить, исследуя динамику «поисковых запросов» и «упоминаний Интернета». С учетом доступности этих данных с очень небольшим лагом аналитик получает преимущество раннего доступа к актуальной информации. Большое количество научных работ по прогнозированию траектории развития социо-экономических систем с использованием Google Trends написано по результату нахождения всего нескольких значимых дескрипторов. Технологии больших данных дают новые интересные возможности для исследователя, и в данной работе было найдено несколько десятков тысяч дескрипторов, чьи временные ряды дают информацию при прогнозировании макроэкономических показателей.

Сочетание этих факторов дает:

— прогноз динамики социально-экономических процессов разных стран;
— возможность оперативного анализа экономической ситуации в стране для принятия решений;
— параллельный контроль достоверности публикуемых официальных данных;
— выявление сигналов Интернета, предикторов рецессии, для дальнейшего мониторинга их динамики.

Базы дескрипторов и индикаторов. Дескрипторы — это аргументы, входящие в прогнозные модели. В качестве дескрипторов могут использоваться термины в форме комбинации униграмм, 2-грамм и 3-грамм слов. Всего было собрано 128 тысяч дескрипторов на русском, и 145 тысяч дескрипторов на английском языках, составляющие предметно-ориентированные базы данных по разным направлениям (экономика, юриспруденция, медицина, производство, и т.п.). Дополнительно, были созданы технические базы, включающие наиболее популярные 2-граммы, 3-граммы и 4-граммы символов на русском и английском языках. Период сбора данных: с 2004 по 2016 гг., частота: квартал и год, источник: запросы в Google Trends и упоминания в поисковой машине Яндекс.

Индикаторы представляют собой макроэкономические параметры. Были собраны данные: «Реальное ВВП», «Экспорт», «Импорт», «Промышленное производство», «Индекс потребительских цен», гг.; «Бюджет»; «Сальдо платежного баланса» % от ВВП; курсы валют «EUR/USD» и «USD/RUB»; «Безработица» в %.

Технология больших данных. А. На первом шаге формируются т.н. топовые выборки по двум критериям отдельно для положительных и отрицательных корреляций выбранного индикатора и каждого из дескрипторов. Здесь корреляция по Пирсону используется для отбора дескрипторов при прогнозе абсолютных (относительных) значений, а ранговая корреляция по Спирмену — при прогнозе направления динамики на 1 шаг. При формировании топовой выборки учитываются лаги на 0-4 квартала и 0-4 года.

На втором шаге для каждого индикатора формируется 16 барометров из топовых выборок для разных знаков корреляций, критериев и смещений. Всего было получено 3700

барометров. Каждый барометр есть устредненный временной ряд по соответствующим временным рядам дескрипторов.

Обзор методов построения баз данных дескрипторов и барометров на основе запросов представлен нами в [1]. В настоящей работе мы применяем указанную выше технику и для построения барометров на основе упоминаний.

Метод группового учета аргументов (МГУА)**.** МГУА относится к алгоритмам машинного обучения. Предложен в 80-е годы украинским академиком А.Г. Ивахненко и с тех пор развивается в разных модификациях его учениками и последователями в Украине и других странах [2]. Теоретические основы МГУА изложены в работе [3]. МГУА выбирает модель с минимумом критерия ошибки на экзаменационной выборке за счет перебора полиномиальных моделей возрастающей сложности в выбранном классе. МГУА реализован в виде набора алгоритмов, основными из которых являются комбинаторный и нейроподобный. Эти алгоритмы и их модификации реализованы в оболочке GMDH Shell [4].

Мы использовали технику МГУА при прогнозе ряда макроэкономических показателей на основе запросов в [5]. Особое внимание мы уделили анализу экономических преступлений, где также используются только запросы [6]. Применение упоминаний, наряду с запросами, впервые отражено в магистерской диссертации автора.

Результаты и выводы. В процессе экспериментов были выбраны: 1) наилучшие алгоритмы оболочки GMDH Shell (комбинаторный, нейроподобный) и 2) наилучшие сигналы (запросы, упоминания) для каждого из упомянутых выше индикаторов. На рис. 1 показаны усредненные результаты экспериментов (США и Россия): ось ординат — относительная ошибка прогноза направления тренда, ось абсцисс — методы и сигналы. Здесь: НС — нейросеть, Комби — комбинаторный, АР — авторегрессия, GT — Google Trend (запросы), Ме — упоминания, Composite и Moody´s — эксперты Bloomberg и Moody´s. Легко видеть, что МГУА оказывается победителем.

Разработанная технология может быть предложена научному сообществу, а также правительственным органам, которые реализуют мониторинг и прогноз социально-экономической ситуации в США, России и других странах.

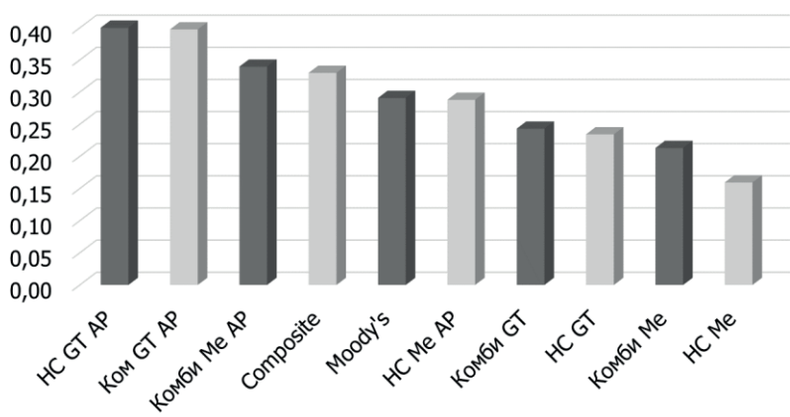


Рис. 1. Результаты моделирования в оболочке GMDH Shell. По оси ординат указана процентная ошибка в направлении прогнозирования

Литература

1. *Boldyreva A., Sobolevskiy O., Alexandrov M., Danilova V.* Creating collections of descriptors based on Internet queries // Proc. of 15th Mexican Intern. Conf. on Artificial Intelligence (MICAI-2016), Springer, LNAI. 2017. V. 10061. P. 303–314.
2. *Stepashko V.* Ideas of academician O. Ivakhnenko in Inductive Modeling field from historical perspective // Proc. of 4th Intern. Conf. on Inductive Modeling (ICIM-2013). 2013. P. 31–37.

3. *Степашко В.С.* Метод критических дисперсий как аналитический аппарат теории индуктивного моделирования // Проблемы управления и информатики. 2008. № 2. С. 8–26.
4. Платформа GMDH Shell: www.gmdhshell.com.
5. *Болдырева А.В.* Построение прогнозных моделей экономической и социальной конъюнктуры по интенсивности запросов в поисковой сети Интернет // Сборник студенческих научных работ РАНХиГС «Современная экономика: теория, политика, инновации». 2016. С. 36–61.
6. *Boldyreva A., Alexandrov M., Koshulko O., Sobolevskiy O.* Queries to Internet as a tool for analysis of regional police work and forecast of crimes in regions // Proc. of 15th Mexican Intern. Conf. on Artificial Intelligence (MICAI-2016), Springer, LNAI. 2017. V. 10061. P. 290–302.

UDC 533.9.07 / 544.558

Optimization of control and operation in hybrid beam plasma systems

J. Ramirez

Moscow Institute of Physics and Technology (State University)

Abstract

Operation of an custom built electron beam chemical plasma reactor are studied, instrumentation and control limitations, underutilization of available resources, and future enhancements for providing more versatility and efficiency are considered. Since instrumentation became the mainstay of experimental research, through time, scientists and developers have increasingly demanding needs within their working tools to succeed. From data acquisition, passing through smart control interfaces integrated into programmable logic controllers for scientific equipment, to mechanical actuators, hardware and microprocessing had become intimately integrated since our daily life, to space technology. Plasma research is now more important than ever in history, due to the technologies developed and in development, for all areas of engineering and science. Worth mentioning examples are: material treatment, food processing, welding, lighting, semiconductor manufacturing, LASER, among others. Due to the difficulty of integration and control of many characteristics both in plasma and the highly specialized equipment associated with it, exits a technological need to bring the advantages of modern era to the equipment which traditionally have been manually operated, thus increasing lifespan, productivity, reproducibility and providing also safety measures if necessary. Hybrid plasma systems are commonly well known for their complexity and flexibility. The amount of possible variables to monitor and control can easily overcome the capacity and ability of an experienced operator, making the realization of experiments cumbersome and user unfriendly, also bringing negative repercussions to the reproducibility of the desired results. Due to the inconvenients previously commented, we applied different techniques of troubleshooting and design, to fulfill needs in all areas applicable to the electron beam hybrid plasma chemical reactor at MIPT Electron Beam Plasma laboratory, which allowed us to precisely determine the optimal conditions of operation of various subsystems which were underutilized, thus increasing the quality of results and consistency of all activities involving this unique equipment, also providing theoretical background useful for future improvements in similar systems.

Technological Problem

Hybrid Plasma Systems, and plasma chemical reactors of hybrid type, are usually equipped with two or more ionizing sources and supporting systems (vacuum chambers, vacuum pumps, gas feeders and others). Combination of RF-gas discharge and electron beam is known to be effective hybrid system applied in plasma chemistry. Joint operation of a radio frequency generator and an electron accelerator together with the various subsystems mentioned above, requires special controls and instrumentation to obtain their compatibility. The solutions suggested are being implemented towards reusing components, involving recycling equipment and tools, minimizing labor and cost.

Experimental technique

Due to the complexity of the hardware involved, became compulsory to have continuous support of the scientists which perform scientific research with all the equipment, thus to have a holistic view of the overall performance and to find and select which improvements were desirable. The first equipment which was selected for deep analysis, was the RF equipment, specifically transport infrastructure, which had problems related to improper balance of the feedline, ground loops to the chamber and improper feed thru shielding. The analysis of standing wave along the feedline, showed that the feedline was longer than required, causing destructive interference, limiting the output power of the radiofrequency generator and making automatcher function impossible. This inconvenients were solved by balancing the feedline to one full wave cycle, coaxial, thick shielding of the feedthru insulator, verification and reinforcement of grounds from radio generator to the chamber. After completing the related activities, successful installation and function of the automatcher was accomplished. During the tests, was noted the lack of properly designed high current handling antennas, which are being built using existing materials, matched for the existing equipment, using modular design techniques, for precise location, quick change, and easy sample loading, thus requiring less reactor downtime, allowing more samples to be processed each journey. The antennas built, possess all metal construction, which also guarantees long life through their usage. The details of antenna design are not yet provided due to minor constant improvements that are being made during test trials. The topologies being used are: spiral inductor, middle tapped and bipolar, dipole, flat dipole, cylindrical dipole, flat dipole with gas injection, porous dipole with gas injection, reverse polarity double barrier dipole, flat coils and plate antennas. The semirigid feedthrough was designed considering the full power of the generator electrically, limited only by temperature, due to the internal polyethylene insulator, inside a multilayer polytetrafluoroethylene jacket, shielded by a RG-8 shield compliant copper braid, to its connection extreme, preventing parasitic discharges when operating at very low pressures. The pivoting design allows to keep the plasma treatment area away from grounds which can deviate power from the antennas to undesired areas of the chamber, thus keeping the energy density only where desired for operation. This can be confirmed visually due to the luminescent nature of most radiofrequency discharge plasmas, allowing quick relocation of the necessary components in case that the discharge location were incorrect.

Among the equipment developed and modifications under test are:

- Specialty custom antennas for gas discharge, barrier and direct which allow partial direction of the discharge towards a sample, which can tolerate, repeated abuse and moderate temperatures, up to 500 ºC.
- Inclusion of an Impedance matching box through careful balance of the feed line and improvements on the feed-thru isolation and radio frequency shielding techniques.
- Custom manufacturing of semi rigid pivoting feed line for the antennas, with no leakage outside of the areas of interest up to 100 ºC, multi layer insulated using high quality vacuum insulators and deoxidized copper.
- Ground loop elimination which derived in enhanced plasma chamber capacitance stability at various pressure levels, including atmospheric.
- Design and construction of support free barrier insulator holders for sample treatment, mainly of cylindrical geometry.

Future development

Due to the good results obtained after conclusion of the suggested modifications to the setup, the following future developments that are being considered:

- Automated data acquisition and logging of common parameters.
- Smart remote control of fluid handling equipment.
- Centralized control of radio frequency devices.
- Automation of pumping facilities.

- Piezoelectric direct plasma discharge and barrier discharge.
- Full directional antennas.
- Archimedes Screw powder treatment reactor.
- Sand-pump powder reactor.
- Flat coil antennas.
- Dynamic magnetic shaping of discharge.
- Robotic sampling, storage, and exposition system, for multi sample per cycle operation.
- Robotic fluid handling system for hybrid plasma fluid treatment.
- Blockage of unauthorized use of selected equipment, emergency condition sensing, out of parameter alarms.

Conclusions

The radio frequency gas discharge systems for plasma-chemical reactors of hybrid type were developed. These systems were equipped with electrodes (antennas) of various designs and were tested with reaction chamber of various geometries. Continuous and interrupted electron beams could be injected into the reaction chambers to generate hybrid plasma. Control of the system was specially developed to minimize power loss in the gas discharge systems within wide ranges of the hybrid plasma generation conditions (RF-power, gas pressure, electron beam power, mode of the beam injection etc). Thus, the hybrid plasma generating system was optimized and full compatibility of its subsystems was proved. Reutilization of available resources and tooling proved to be an enhancing factor along as low cost instrumentation techniques to provide some degree of automation to increase the productivity of the facility, as well providing ease of usage, safety characteristics and more important increased productivity and result reproducibility.

Acknowledgements

Prof. Mikhail Vasiliev, Eng. Alexander Manohin, Prof. Tatiana Vasilieva, Msc. Vladimir Myasnikov, for their continuous help and support through the development of activities at the laboratory. Thanks to the International Students Office, Mrs. Irina Obukhova, Ksenia Nikitina, Marina Fomina and Polina Golubkova. Thanks to the Ministry of Education of the Russian Federation.

Key Words

Hybrid plasmas, Atmospheric Pressure Plasmas, Plasma Control, Automation, Low Cost Instrumentation.

УДК 004.023

Иерархическое тематическое моделирование корпуса документов на основе группировки его предметного словаря по вертикали и горизонтали

А.А. Кононова

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Терминология. Тематическое моделирование (ТМ) – способ построения модели корпуса текстовых документов, которая определяет, к каким темам относится каждый из документов [1]. Иерархическое тематическое моделирование предполагает построение модели, где темы распределены по уровням, отражающим степень их общности/частности. В ТМ обычно принимаются следующие допущения по темам и документам: (1а) темы заранее неизвестны; (1б) каждая тема представляется своим словарем; (2а) темы отражаются на множестве документов; (2б) документ может отражать сразу несколько тем. К этим позициям можно дать следующие комментарии: число всех тем в корпусе может быть ограничено сверху и/или снизу, словари тем могут пересекаться, задачу ТМ можно

решать для одного документа после его фрагментации, число тем в одном отдельном документе может быть ограничено.

Постановка задачи. Вертикальная группировка некоторого словаря терминов есть разделение этого словаря на иерархию терминов, а именно, термины 1-го уровня, 2-го уровня, и т.д. Горизонтальная группировка некоторого словаря терминов есть просто разделение словаря на под-словари. Мы ассоциируем термины младших уровней с более общими темами, а термины старших уровней – с более частными темами. Мы также ассоциируем термины под-словарей одного уровня с разными под-темами данного уровня. Таким образом, вертикальная, и затем горизонтальная группировки терминов решают проблему иерархического ТМ. В настоящей работе мы предлагаем технологию решения этой проблемы, которая обеспечивает оптимальную сложность полученной модели за счет применения: масштабируемого пользователем предметного словаря и МГУА-подобных методов группировки объектов.

Актуальность. В настоящее время ТМ есть одно из наиболее популярных направлений в Text Mining – разведочном анализе текстов. Традиционной постановкой задачи здесь является вероятностное ТМ, где получены значимые результаты [2]. Дальнейшее развитие вероятностного ТМ привело к иерархическому вероятностному ТМ [3], которое пока представлено ограниченным числом публикаций. Следует сказать, что вероятностное тематическое моделирование требует достаточно сильных предпосылок и сложных процедур для своей реализации. Открытым остается вопрос об оптимальной сложности полученной модели и этот вопрос напрямую связан с помехоустойчивостью модели. Указанные обстоятельства определяют актуальность выполненной работы.

Алгоритм. На первом шаге формируется словарь предметной области корпуса текстов на основе критерия специфичности [4]. Здесь из корпуса текстов выбираются термины, чья относительная частота появления во всем корпусе или каждом документе корпуса в S-раз превышает их относительную частоту, заданную в некоторой базовой лексике (список термин-частота). Здесь S (specificity) есть параметр специфичности. В частности, в качестве базовой лексики может использоваться Генеральная лексика, не связанная с предметной областью. В настоящей работе мы использовали Генеральную лексику английского языка [5]. Значение S выбирается пользователем с учетом следующих трех требований: полнота словаря (максимальное число терминов корпуса, значимых для задачи), точность словаря (минимальное число терминов корпуса, незначимых для задачи), устойчивость словаря (несущественные изменения словаря при вариациях S). Отметим, что уже при $S = 5$ удаляются все стоп-слова и общеупотребительная лексика. Масштабируемость словаря состоит в таком ручном выборе параметра, задающего состав словаря корпуса. Обычные значения $S = 10, 20,50$.

На втором шаге проводится группировка предметного словаря по степени его общности/частности. Здесь используется МГУА-подобная техника построения модели, предложенная в [6]. Результатом является разделение словаря на уровни, по степени общности/частности терминов. Группировка терминов является жесткой, т.е. каждый термин принадлежит только одному уровню. МГУА или Метод Группового Учета Аргументов — это подход, предложенный в 80-е годы акад А. Ивахненко, который активно развивается Украинской школой индуктивного моделирования [7]. Теоретические основы МГУА изложены в [8]. Эта техника позволяет строить модели оптимальной сложности в рамках выбранного класса моделей, путем их направленного перебора от простых к сложным. Ключевым элементом при переборе является применение внешних критериев, отражающих близость моделей на двух выборках данных.

На третьем шаге проводится кластеризация терминов каждого уровня, полученных на втором шаге. Здесь используется МГУА-подобная техника, подробно изложенная в [9]. В нашей работе используется упрощенный вариант подхода, изложенного в указанной работе, где кластеризация проводится на каждой из двух выборок размытым k-means. Результатом является число кластеров-тем и словари каждой темы.

В предложенном алгоритме: а) вертикальная группировка является жесткой, то есть каждый термин принадлежит только одному уровню; б) горизонтальная группировка

является мягкой, то есть каждый термин может принадлежать нескольким под-словарям одного уровня.

Эксперимент 1. Выделение иерархий является новой, а потому и наиболее уязвимой частью алгоритма (второй шаг, см. выше), поэтому, был выполнен эксперимент на искусственном наборе данных с заранее известным результатом. Искусственные данные составляли образы текстов, отражающих 3-уровневую иерархию терминов. Рассматривалось 4 варианта распределения терминов как комбинации двух условий: а) начальное упорядочивание терминов проводилось либо по значениям энтропии, либо по обратному коэффициенту вариации и б) распределение терминов на каждом уровне было выполнено либо по равномерному, либо по треугольному закону. Параметры распределения варьировались, что отражало разную степень случайности, а значит, и шума в данных. Эксперимент показал работоспособность алгоритма и показал условия, при которых выявление иерархий выполняется с наименьшим числом ошибок.

Эксперимент 2. Эксперимент проводился на известном корпусе mini 20NewsGroups, который представлял собой уменьшенный и сбалансированный корпус 20Newsgroups [10]. Этот корпус играл роль теста с известным числом тем (20) и известным числом уровней (2). Каждая тема была представлена одинаковым числом документов (100). Исследовалось влияние: а) коэффициента специфичности при построении предметного словаря (шаг 1 алгоритма); б) порога различий в распределении терминов на двух выборках при вертикальной группировке (шаг 2 алгоритма); в) индексов близости кластеризаций терминов на двух выборках при горизонтальной группировке (шаг 3 алгоритма). Оценка качества результатов выполнялась вручную экспертами раздельно для числа уровней, числа тем на каждом уровне, и описания тем на каждом уровне. В лучшей комбинации указанных выше параметров алгоритма полученные результаты в целом вполне соответствовали характеристикам корпуса mini 20NewsGroups. В качественной шкале это совпадение можно оценить в 80%. В количественной шкале оценка совпадения не проводилась ввиду отсутствия устоявшихся мер близости иерархий тем. В дальнейшем такие оценки будут сделаны.

Будущее работы. Результаты иерархического ТМ могут быть использованы для операций суммаризации документов, кластеризации документов и построения онтологии, которые выполняются на разных уровнях детализации. Именно эти приложения составят направления будущих работ в рамках предложенной технологии.

Литература

1. Тематическое моделирование // Ресурс http://www.machinelearning.ru, статья «Тематическое моделирование».
2. *Воронцов К.В.* Вероятностное тематическое моделирование: обзор моделей и регуляризационный подход, // ВЦ РАН, 2017, 66 с. http://www.machinelearning.ru/wiki/images/d/d5/Voron17survey-artm.pdf.
3. *Златов А.С., Кузьмин А.А.* Построение иерархической тематической модели крупной конференции. // Искусственный интеллект и принятие решений. 2016, № 3, С. 77–86.
4. *Lopez, R., Alexandrov, M*. LexisTerm – The Program for term selection by the criterion of specificity, // In: “Artificial Intelligence Applications to Business and Engineering Domains”, ITHEA Publ, 2011, V. 24. P. 8–15.
5. *Kilgarriff A.* BNC database and word frequency lists, 2011 // http://www.kilgarriff.co.uk/bnc-readme.html.
6. *Ponomareva N*. Revealing granularity of domain terminology with inductive method of model self-organization // Language Forum, 2008, V. 34, N. 1, P. 12.
7. *Stepashko V.* Ideas of academician O. Ivakhnenko in Inductive Modeling field from historical perspective // Proc. of 4th Intern. Conf. on Inductive Modeling (ICIM-2013). Kyiv: IRTC of NAS of Ukraine, 2013. P. 31–37.
8. *Степашко, В.С.* Метод критических дисперсий как аналитический аппарат теории индуктивного моделирования. // Проблемы управления и информатики. Киев, НАН Украины, 2008, № 2, С. 8–26.
9. *Сарычева Л.В.* Объективный кластерный анализ данных на основе МГУА // Индуктивное моделирование сложных систем, НАН Украины, 2008, № 2. С. 86–104.

10. Newsgroups // http:// kdd.ics.uci.edu/databases/20newsgroups/20newsgroups.data.html

УДК 656.052.2

Система online бронирования доков

В.Е. Вахоцкая

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Система бронирования доков – это система, позволяющая бронировать складские доки на загрузку или разгрузку транспортных средств (ТС) в режиме online. Бронирование доков позволяет уменьшить количество задержек и пробок на въезде на склад, дисциплинировать водителей и улучшить общий логистический процесс компании.

Online бронирование решает ряд следующих проблем:

- устраняет задержки и пробки на въезде на склад или к магазинам;
- дисциплинирует работу водителей и работников склада;
- вводит четкое расписание приезда ТС в пункты погрузки/разгрузки.

Разработанная система внедряется как часть WMS (Warehouse Management System) или TMS (Transportation Management System), что позволяет обеспечить работу в едином пространстве.

Основной функционал системы.

Составление расписания приезда ТС на погрузку или разгрузку в режиме реального времени. Для этого необходимо подключение к системе перевозчика. Перевозчик заходит в систему, выбирает дату, склад, номер дока и время прибытия. Если перевозчик забронировал время, то это видят сотрудники склада и другие перевозчики. В случае задержек перевозчик может отменить бронирование и перенести его на любое удобное и доступное время.

Установка тайминга. Сутки делятся на равные интервалы времени, например, 30 минут – 48 ячеек для бронирования. Период бронирования можно менять на любое удобное для склада время. Также система учитывает, что склад работает не круглые сутки и некоторые ячейки можно сделать недоступными для бронирования.

Информирование и коммуникация. При бронировании перевозчик может оставить сообщение диспетчерам в случае изменения типа погрузки/разгрузки. В свою очередь диспетчер в системе видит номер ТС, что позволяет увеличить безопасность работы

Сочетаемость с Track&Trace. При совмещении системы бронирования доков и системы Track&Trace, система сама подсчитывает время прибытия на склад с помощью установленных бортовых устройств, которые отслеживают и фиксируют скорость передвижения и местонахождение ТС.

УДК 336.648

Предложения по улучшению условий для развития проектного финансирования в РФ на основании анализа мировых практик

Е.С. Петровская[1,2], Е.В. Худько[2,3]

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет),
[2]Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации,
[3]Институт экономической политики имени Е.Т. Гайдара

Проектное финансирование играет важную роль в модернизации производства, развитии инфраструктуры и совершенствовании социальных условий, т.к. открываются возможности для предпринимателей и бизнеса получить доступ к финансовым ресурсам для осуществления проектов по улучшению жизни общества в разных сферах.

На сегодняшний день проектное финансирование в России недостаточно хорошо развито в отличие от стран ЕС и США, а также от такой наднациональной организации, как Всемирный банк. В этих странах и организациях для проектного финансирования выделяются достаточно крупные объёмы средств из гос. бюджета. Финансирование распределяется по отраслевым направлениям – начиная от технологических проектов и разработок и заканчивая укреплением социальных институтов. Стоит отметить, что направления деятельности задаются не как конкретная отрасль, а как задача, которая ставится перед обществом. Например, поддержка перехода к экономике с низким уровнем выбросов углерода во всех секторах. Для определения направлений проектного финансирования, создаются наблюдательные органы. Они обычно состоят из региональных и местных органов власти, экономических и социальных партнеров. Выбор приоритетных проектов происходит на основании национальных или региональных многолетних программ. Разработка и утверждение этих программ являются сферой деятельности органов власти.

В ЕС финансирование распределяется по фондам в соответствии с их тематикой. Для достаточно широкого профиля проектов существует устоявшийся механизм финансирования. Средства от Еврокомиссии поступают в Европейский инвестиционный банк (ЕИБ), Европейский инвестиционный фонд (ЕИФ) либо в местные органы управления в каждой стране, которые затем передают средства финансовым посредникам – банкам, гарантийным обществам, микрофинансовым операторам, венчурным фондам и фондам, финансирующим посредством акций. Далее финансирование поступает к предпринимателям и бизнесу в форме займов, гарантий, венчурного капитала. Возможен также вариант прямого финансирования предпринимателей и бизнеса со стороны ЕИБ [1].

Проектное финансирование в США можно разделить на государственное и негосударственное. Негосударственное регулируется правилами каждого отдельного фонда. Государственное проектное финансирование доступно всем начиная от гос. органов и заканчивая отдельными гражданами и иностранными агентами. В отличие от ЕС финансирование осуществляется через департаменты, ответственные за определенные сферы общественной жизни. Далее департаменты рассматривают каждую отдельную заявку и выносят по ней решение об обеспечении финансированием или отказе [3, 4].

Всемирный банк имеет другой механизм финансирования. Финансирование проекта обычно осуществляется в форме ограниченного займа, выдаваемого специально созданной проектной компании. Результативность специальной проектной компании будет зависеть от потоков доходов контрактных соглашений и/или от тарифов для конечных пользователей, которые начнутся только после завершения строительства и реализации проекта. Это сопряжено с высоким риском, поэтому до того, как кредиторы согласятся предоставить финансирование, они проводят тщательную проверку жизнеспособности проекта и анализ того, обеспечивает ли распределение рисков по проекту достаточную защиту проектной компании [2].

Общими чертами международного опыта проектного финансирования являются определение направлений и правил распределения финансирования на высшем уровне руководства, реализация механизмов на более низком уровне, подробное рассмотрение каждого проекта. Основным различием является способ реализации – в США реализацией занимаются департаменты, в ЕС за это ответственны местные органы власти каждой страны, Всемирный банк имеет отдел, который занимается данным вопросом.

В РФ применение рассмотренных механизмов возможно с корректировками, связанными с менталитетом и сложившимися особенностями нашего государства. Основными проблемами считаются неопределённость рынка инвестиционных проектов, отсутствие необходимой законодательной базы, недостаточный уровень контроля выполнения проекта, ограниченность долгосрочных заемных ресурсов. Развитие проектного финансирования может сыграть важную роль в стимулировании инвестиционного процесса в России.

Литература

1. GUIDANCE FOR BENEFICIARIES of European Structural and Investment Funds and related EU instruments / European Commission. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014. 58 с.
2. Раздел официальный сайт Всемирного банка PUBLIC-PRIVATE-PARTNERSHIP IN INFRASTRUCTURE RESOURCE CENTER. https://ppp.worldbank.org/.
3. Официальный сайт грантовой поддержки США. https://www.grants.gov/.
4. Официальные сайты департаментов США https://www.usda.gov, https://www.defense.gov и др.

УДК 004.622

Важность корректности данных в информационных системах и методы их сбора на практике

Р.Н. Курбанов

Московский технологический университет

В докладе рассматриваются примеры некорректных данных в информационной системе, в данном случае – в веб-ориентированной информационной системе в области транспортной логистики. Конкретные примеры проблем в процессе разработки и работы информационной системы – от сконфуженных пользователей до складов, согласно данным, находящихся в середине океана, – случаи, где корнем проблем являются некорректные данные, а также случаи появления, приобретения и, в следствие интерполяции некорректных данных, будут приведены и рассмотрены ниже.

Помимо простого описания проблем будут рассмотрены способы их решения, а также раннего предупреждения – от простого фиксирования типа поля ввода, до обращения к внешним географическим сервисам для проверки корректности данных.

Рассматривается последний встреченный пример, в котором при проекции точек доставки и складов на карте получилась следующая картина (рис. 1).

На первый взгляд, на карте несколько точек почему-то расположены в других странах (рис. 2). Если рассмотреть карту поближе, замечаются точки в абсурдных местах, например, в реках (рис. 3). Это пример некорректных данных. Точки проецируются на карту с помощью конвертирования адреса точки через службу-геокодер, где адрес преобразуется в координаты.

Если рассматривать каждую из таких “абсурдных” точек, можно заметить некоторую закономерность – такие точки либо не соблюдают конвенцию именования адреса (рис. 4), либо не имели адреса как такового, вместо этого - имея название того, что должно находится по адресу или относительный адрес точки, не имеющий при этом контекста (рис. 3).

Теперь перейдем от очевидной проблемы к тому, что её вызвало. Во-первых, данные с адресами точек приходят из другой системы, назовем её системой Б, после чего попадают в базу данных нашей системы, систему А. Предполагается, что в системе Б, поле “Адрес” имеет чисто строковой тип без всяких ограничений, позволяющий пользователю ввести произвольные данные, рассчитывая только на его ответственность. Так как на ответственность и компетентность пользователя в этом случае полагаться нельзя (хочу отметить, на это нельзя полагаться в любом случае) – как показали результаты этого метода, в системе Б вместо этого поля следует поставить поле с живым поиском, при котором возможно только выбрать адрес среди уже имеющихся, иначе данные считаются невалидными (рис. 5).

В случае, отличном от нашего, поле с живым поиском по адресу считалось бы идеальным решением, но так как сбор данных происходит в системе Б, вне нашего контроля, имеются ограничения по его реализации, так как доступа к разработке системы Б нет. В этом случае предлагаю контроль и фильтрацию получаемых данных, при котором адрес проверяется на валидность на стадии обработки, перед тем как попадет в систему. На практике это выглядит, как запрос на службу, имеющую корректные адреса с целью

верификации приходящего адреса. И так для каждого приходящего адреса. В случае если адрес невалиден – он не попадет в систему.

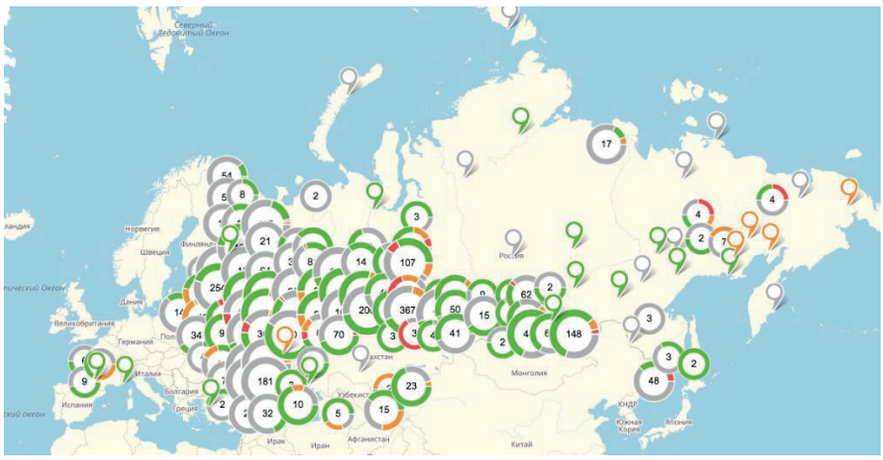


Рис. 1. Проекция точек склада и доставки на карту, согласно данным. Круглые точки именуются кластерами точек. Размер и номер на кластерах соответствует концентрации точек в кластере

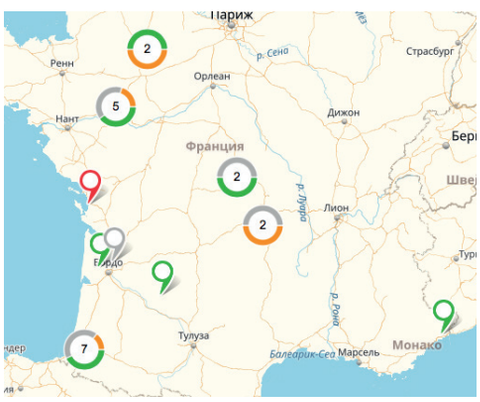


Рис. 2. Кластеры точек и точки, расположенные вне России по вине некорректных данных

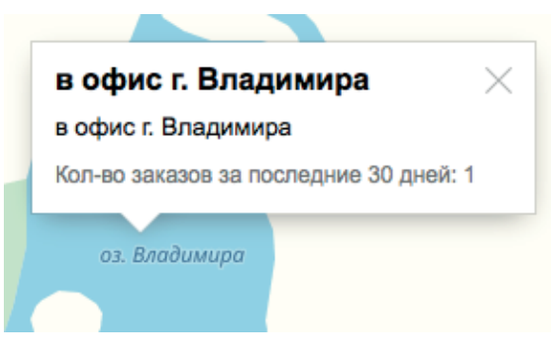


Рис. 3. Неправильное именование точки привело к неправильному определению координат геокодером

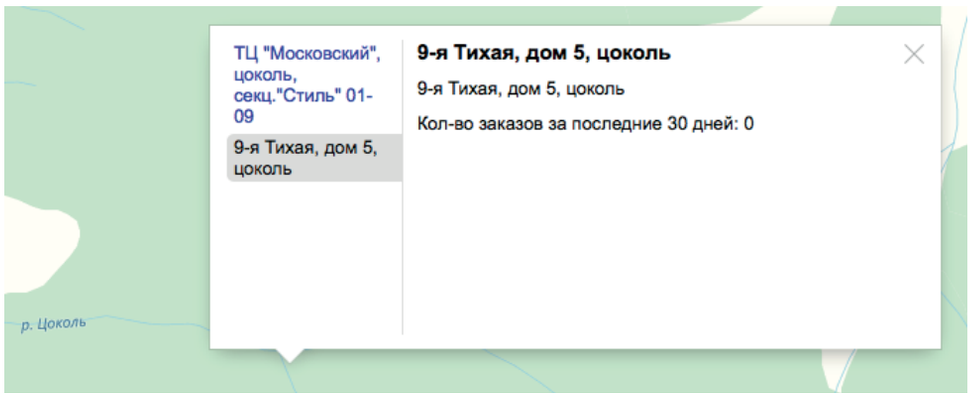


Рис. 4. Несоблюдение конвенции при именовании точки

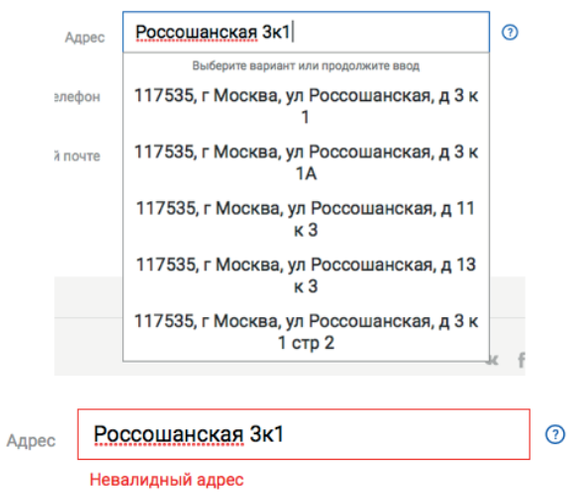


Рис. 5. Пример поля с живым поиском по адресу, при котором неподходящий адрес считается невалидным

УДК 658.5.012.7

Безопасность производства и логистики сжиженного природного газа в арктических условиях

А.А. Пшеничникова

Московский физико-технический институт (государственный университет)

В работе рассмотрены виды воздействия на окружающую среду различных стадий производства и транспортировки СПГ. Жизненный цикл СПГ состоит из нескольких этапов: добыча природного газа, сжижение, хранение, транспортировка, регазификация, передача конечному потребителю. Вред особо ощутим, если производство СПГ находится на экологически ценных территориях, когда негативное воздействие испытывают редкие виды животных и растений, а также места их обитания. Того же можно ожидать, если природные экосистемы имеют низкую способность к самовосстановлению, например, в арктических широтах. Поскольку СПГ состоит в основном из метана, то актуальным является вопрос о последствиях выбросов в атмосферу парниковых газов и влиянии производства и транспортировки СПГ на глобальное изменение климата.

Строительство трубопроводов и заводов по сжижению газа приводит к изменению природных экосистем. За счет выбросов продуктов сгорания происходит ухудшение

качества воздуха. К основным видам негативного воздействия также можно отнести шум и искусственное освещение при проведении строительных работ и эксплуатации различной техники, которые являются факторами беспокойства для различных видов фауны. В ходе гидравлических испытаний оборудования завода СПГ и его вспомогательных объектов образуются значительные объемы сточных вод, которые требуют очистки до нормативных показателей.Особое беспокойство экологов вызывают проекты, реализуемые в зоне вечной мерзлоты. Термическое воздействие на грунты приводит к изменению криогенных режимов многолетнемерзлых пород как на поверхности, так и на глубине. В результате может повышаться температура грунтов и происходить частичное таяние вечной мерзлоты.Отгрузка и последующая транспортировка СПГ характеризуется шумовыми и световыми воздействиями, выбросами загрязняющих веществ в атмосферу, сбросами сточных вод в акваторию. Кроме того, во время судоходства возможны утечки различных технических жидкостей с судов. Воздействие на окружающую среду при строительстве терминалов приемки СПГ аналогично воздействию от строительства заводов по сжижению газа и причалов загрузки СПГ. Режим эксплуатации терминала приемки СПГ аналогично порту загрузки характеризуется шумовым и световым воздействиями, выбросами загрязняющих веществ и парниковых газов в атмосферу, сбросами сточных вод в акваторию, воздействием на наземную и морскую флору и фауну.

При хранении больших объемов СПГ часто наблюдается такое явление, как перемещение фаз жидкости внутри резервуаров. Сжиженный газ разделяется на несколько слоев разной плотности, что приводит к изменению распределения давления в резервуаре СПГ. Эта ситуация может стать причиной взрыва и последующего разрушения резервуара, если предохранительные клапаны функционируют ненадлежащим образом. Значительную пожарную опасность представляет газопаровое облако, образующееся при разливе СПГ. Помимо высоких температур фактором риска для СПГ являются также и низкие температуры. Так, в Арктике суровые условия порой приводят к авариям в судоходстве. Для арктических условий следует изучить специальный криогенный эффект, связанный с переохлаждением корпусов судов СПГ. Также прочности газовозов может угрожать ледообразование при разливах СПГ. Кроме того, необходимо учитывать, что СПГ – криогенная жидкость, вызывающая «холодные ожоги» на теле человека или животного при прямом контакте.

Литература

1. *Аметистова Л.Е., Книжников А.Ю.* Экологические аспекты СПГ-проектов в арктических условиях. М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF), 2016. 48 с.
2. Международная финансовая корпорация IFC, группа Всемирного банка. Руководство по охране окружающей среды, здоровья и труда для работ по производству, транспортировке и регазификации сжиженного природного газа (СПГ), 2007.
3. *Книжников А.Ю.* [*и др*.]. Перспективы использования СПГ в Арктическом регионе России // Oil&Gas Journal Russia. 2017. № 05. С. 72–79.

Секция компьютерного моделирования

УДК 004.75

Оптимизация системы распределенных вычислений с целью снижения времени расчетов аэродинамических характеристик летательных аппаратов

Д.В. Апраксин

Московский физико-технический институт (государственный университет)

В работе проведено исследование возможностей снижения времени расчетов при распределенной схеме организации расчета в конфигурации по умолчанию (1) и в конфигурации с применением оптимизированных настроек программных средств (2). Конфигурация 1 состоит из двух высокопроизводительных кластеров различной производительности и архитектуры, соединенных по локальной вычислительной сети (ЛВС). Кластеры работают под управлением своих операционных систем (без специфических настроек), двух локальных планировщиков (torque) и одного распределенного планировщика и менеджера ресурсов (moab). Конфигурация 2, в свою очередь, состоит из тех же двух высокопроизводительных кластеров, которые работают под управлением своих операционных систем со специфическими настройками (стек TCP/IP, оптимизация драйверов, настройки пакета OpenMPI), двух локальных планировщиков (torque) и одного распределенного планировщика и менеджера ресурсов (moab), также имеющих специфические настройки. В качестве расчетных продуктов использовались пакеты компании ANSYS. В конфигурациях 1 и 2 проводились аэродинамические расчеты задачи обтекания компоновки вязким дозвуковым потоком.

В результате проведенной работы:

- организован эффективный распределенный расчет;
- определены основные направления снижения времени расчета;
- разработан набор рекомендаций для организации оптимизированного времени расчета.

Литература

1. *Belotserkovsky O.M.* Modern Solution Methods for Nonlinear Multidimensional Problems. Mathematics. Mechanics. Turbulence. Lewiston: The Edwin Mellen Press, 2000.
2. *Воеводин В.В.*, *Воеводин Вл.В.* Параллельные вычисления. СПб: БХВ-Петербург, 2002.
3. *Олифер В.Г.*, *Олифер Н.А.* Сетевые операционные системы. СПб: Питер, 2001.

УДК 533.6.011.8

Нелинейные явления в разреженном газе в задаче Куэтта

Вьонг Ван Тьен[1]***, С.Л. Горелов***[1,2]

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2]Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского

Исследуются процессы тепломассопереноса в разреженном газе между двумя бесконечными параллельными пластинами [1, 2], которые имеют разные температуры T_0 и T_1 и движутся относительно друг друга со скоростью W.

В работе были проведены расчеты для параметров касательного Pxy и нормального Pyy тензора напряжений и потока энергии к двужущей стенке Q при

определенной относительной скорости $Sw = W / \sqrt{2kT_1}$ и отношении температуры между пластинами $t = T_0 / T_1$ в зависимости от числа Кнудсена. Расчеты полученны методом прямого статистического моделирования. Для теплового потока результаты сравнивались с результатом, полученным методом самоподобной интерполяции.

На рис. 1 и рис. 2 показаны зависимости касательной Pxy / Sw и нормальной Pyy составляющих тензора напряжений от числа Кнудсена при отношении температур между пластинами $t = 1$. Установлено, что в переходной области между свободномолекулярным и сплошносредным пределами, кроме касательной составляющей тензора напряжений, присутствует нормальная составляющая (которой нет ни в свободномолекулярном случае, ни в случае сплошной среды), причем, и нормальная и касательная составляющие существенно немонотонны по числам Кнудсена. Величина максимума этих напряжений зависит от скорости движения пластин Sw.

На рис. 3 представлены результаты расчетов теплового потока для разных отношений температур пластин t при разных значениях числа Кнудсена Kn и относительной скорости пластин $Sw = 0.5$. Из рисунка видно, что при фиксированных значениях отношений температур и скоростей пластин тепловой поток к движущей пластине в зависимости от числа Кнудсена меняет знак. Сплошными кривыми нанесены результаты, полученные методом самоподобной интерполяции, точками – методом прямого статистического моделирования.

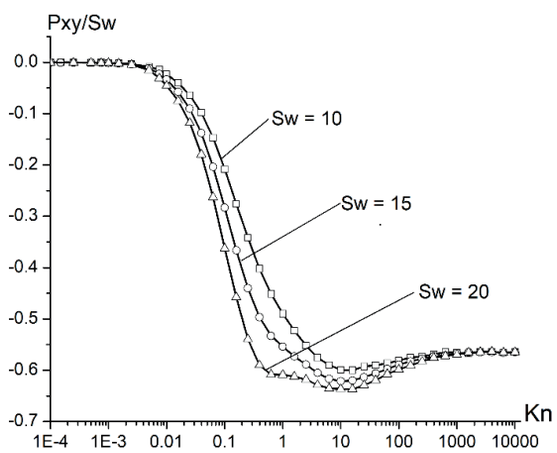


Рис. 1. Зависимость Pxy / Sw от числа Кнудсена при $t = 1$ и разных значениях относительной скорости Sw

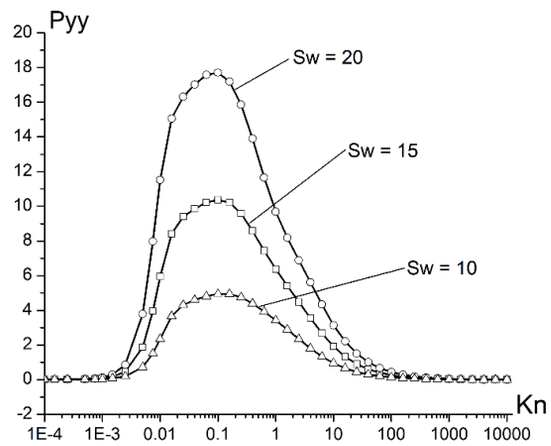


Рис. 2. Зависимость Pyy от числа Кнудсена при $t = 1$ и разных значениях относительной скорости Sw

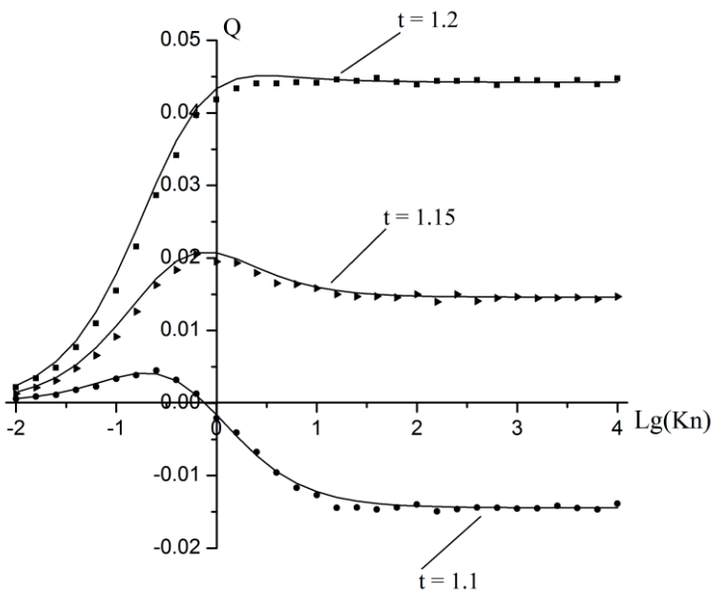


Рис. 3. Зависимость теплового потока Q от числа Кнудсена при относительной скорости $Sw = 0.5$

Литература

1. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974.
2. *Коган М.Н.* Динамика разреженного газа. М.: Наука, 1967.
3. *Горелов С.Л., Выонг Ван Тьен* Течение Куэтта и теплопередача между параллельными пластинами в разреженном газе // Матем. моделирование, 2014. Т. 1. № 10. С. 33–46.

УДК 533.6.011.8

Метод Монте-Карло в задаче о распространении периодических возмущений в разреженном газе

С.Л. Горелов[1,2], К.А. Чопова[1]

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2]Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского

Изучается влияние приемника на фазу и амплитуду возмущения. Показано, что если расстояние между источником и приемником мало, то происходят качественные изменения в характеристиках.

В данной работе рассматривается распространение плоских волн в разреженном газе вдоль оси. Разреженный газ находится между двумя бесконечными параллельными пластинами. Одна пластина колеблется относительно начала координат по нормали к пластине вдоль координаты по гармоническому закону с нормальной скоростью

В случае распространения звука, то есть когда скорость колебания пластины много меньше скорости звука, подобная задача решалась в [1]. Целью настоящей работы является разработка метода Монте-Карло для решения задачи о распространении периодических возмущений в сильно разреженном газе в случае, когда скорость движения пластины произвольная.

В случае, когда скорость колебаний мала (акустика), исследуется распространенея звука с учетом влияния приемника для свободномолекулярной модели газа. Показано, что приемник значительно изменяет характеристики распространения звука.

Результаты расчетов сравниваются с результатами работы [1].

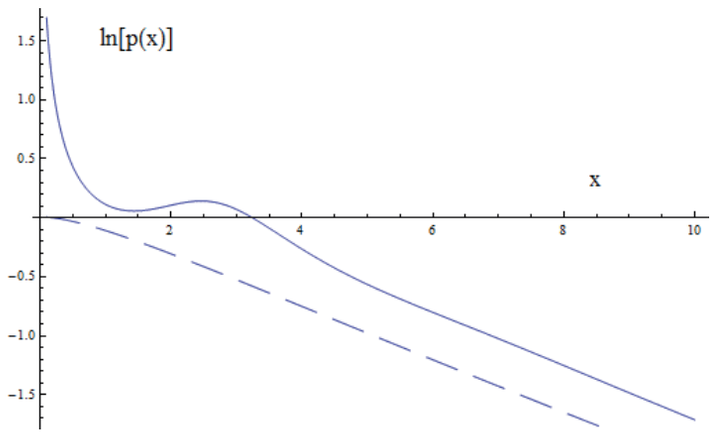


Рис. 1. Зависимость амплитуды от расстояния. Пунктир – приемника нет, сплошная кривая – приемник находится на расстоянии от источника

Литература

1. *Sharipov F., Marques W., Kremer G.M.* Free molecular sound propagation. J. Acoust. Soc. Am. 2002, V. 112, N. 2 P. 395–401.
2. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Гидродинамика. М.: Наука, 1986, 736 с.

УДК 533.6.001/519.63

Решение задач обледенения профиля в приближении «тонкого льда» методом Галеркина с разрывными базисными функциями

А.В. Волков[1,2], Т.Д. Зыонг[2]

[1]Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского
[2]Московский физико-технический институт (государственный университет)

Рассмотрено решение системы уравнений водности конечно-элементным методом Галеркина с разрывными базисными функциями (РМГ). Моделирование распределения капель воды на поверхности профиля. Рассчитан коэффициент захвата, что дает возможность решить задачу обледенения твердого тела в приближении «тонкого льда». Расчетные результаты сопоставлены с экспериментальными данными.

При решении задачи водности с использованием подхода Эйлера воздух и капли водяной взвеси описываются как две жидкости, которые взаимодействуют друг с другом. В типичном случае, в условиях обледенения, плотность капель воды порядка 10^{-4} и очень мала по сравнению с плотностью воздуха, что приводит к пренебрежению влиянием капельки воды на воздух. Сила сопротивления воздуха, влияющего на водность, играет главную роль. Итак, нестационарная система уравнений водности может быть представлена в следующей форме:

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \nabla.\mathbf{F}\left(\mathbf{Q}\right) = \mathbf{S}\left(\mathbf{Q},\mathbf{G}\right), \qquad (1)$$

где $\mathbf{Q} = [r, u, v, w]^{\mathrm{T}}$, $\mathbf{F} = \left[\mathbf{F}_x, \mathbf{F}_y, \mathbf{F}_z\right]$, $\mathbf{F}_x = \left[\rho u, u^2, uv, uw\right]^{\mathrm{T}}$, $\mathbf{F}_y = \left[\rho v, vu, v^2, vw\right]^{\mathrm{T}}$,

$\mathbf{F}_z = \left[\rho w, wu, wv, w^2\right]^{\mathrm{T}}$, $\mathbf{G}_x = \left[\frac{\partial r}{\partial x}; \frac{\partial u}{\partial x}; \frac{\partial v}{\partial x}; \frac{\partial w}{\partial x}\right]^{\mathrm{T}}$, $\mathbf{G}_y = \left[\frac{\partial r}{\partial y}; \frac{\partial u}{\partial y}; \frac{\partial v}{\partial y}; \frac{\partial w}{\partial y}\right]^{\mathrm{T}}$,

$\mathbf{G}_z = \left[\frac{\partial r}{\partial z}; \frac{\partial u}{\partial z}; \frac{\partial v}{\partial z}; \frac{\partial w}{\partial z}\right]^{\mathrm{T}}$,

$\mathbf{S}(\mathbf{Q}, \mathbf{G}) = [0, c_{\mathrm{f}}\left(u_a - u\right) + u\, div\, \mathbf{u}, c_{\mathrm{f}}\left(v_a - v\right) + v\, div\, \mathbf{u}, c_{\mathrm{f}}\left(w_a - w\right) + w\, div\, \mathbf{u}]^{\mathrm{T}}$.

Для построения конечно-элементной аппроксимации системы (1), основанной на методе РМГ [1], примитивные переменные (ρ, u, v, w) в каждом элементе расчетной области представляются в виде линейной комбинации локальных полиномиальных базисных функций $\varphi_{\mathrm{j}}(\mathbf{x})$: $\mathbf{Q} = \sum_{j=1}^{K_f} \mathbf{q}_{\mathrm{j}} \varphi_{\mathrm{j}}(\mathbf{x})$. В качестве базисных функций в данной работе используются ортогональные функции. В конечном итоге, система уравнений водности для коэффициентов разложений $\mathbf{q}_{\mathrm{j}}(t)$ имеет следующий вид:

$$\frac{d\,\mathbf{q}_{\mathrm{i}}}{d\,t} = \left[-\oint_{\Sigma} \varphi_{\mathrm{i}}\, \mathbf{F}\, \mathbf{n}\, d\,\Sigma + \int_{\Omega} \nabla \varphi_{\mathrm{i}}\, \mathbf{F}\, d\,\Omega + \int_{\Omega} \varphi_{\mathrm{i}}\, \mathbf{S}\, d\,\Omega \right]. \qquad (2)$$

Градиенты примитивных переменных $\mathbf{G}$ в (2) найдены методом Bassi–Rebay 2 (BR2) [2].

В качестве двумерного теста проведены расчеты обтекания профиля MS(1)-317 со следующими параметрами: скорость набегающего потока $u_\infty = 78.68$ м/с, статическое давление $P = 89867$ Па, температура $T = 279.26°$ К, диаметр капель $MVD = 11.5$ мкм, водность $\rho = 0.04$ кг/м^3. На рис. 1а представлен график зависимости коэффициента захвата от горизонтальной координаты при различной максимальной степени базисного полинома. В эксперименте максимальный коэффициент захвата равен $\beta_{\text{экс}} = 0{,}306$, из этого значения и при использовании формулы $\delta = \frac{\beta_{\text{расчет}} - \beta_{\text{экс}}}{\beta_{\text{экс}}}$ были оценены максимальные расхождения в расчете и эксперименте различных степеней полинома. Эти результаты показаны в таблице 1.

В качестве трехмерного теста проведены расчеты обтекания крыла профилем NACA 64A008. На рис. 1б представлен график зависимости коэффициент захвата, на поверхности крыла в сечении $z = 0.61$ м на угле атаки $\alpha = 0^0$. На рис. 2 показано поле водности на поверхности крыла и на плоскости симметрии при угле атаки $\alpha = 0°$ и $K = 2$. Видно, что для случая K = 1 максимальный коэффициент захвата в расчете и в эксперименте имеет существенные различия, а для случая K = 2 расхождение равно 4.02% и приемлемо с точки зрения практического использования.

Таким образом, разработанный метод позволяет получать решения с высоким порядком точности, что обеспечивает наименьшие затраты вычислительных ресурсов по сравнению с широко используемым в настоящее время методом конечного объема второго порядка точности.

Таблица 1

Коэффициент захвата при различных K

K	Коэффициент захвата	Расхождение δ
K1	0,274	10,46%
K2	0,305	0,327%
K3	0,307	0,327

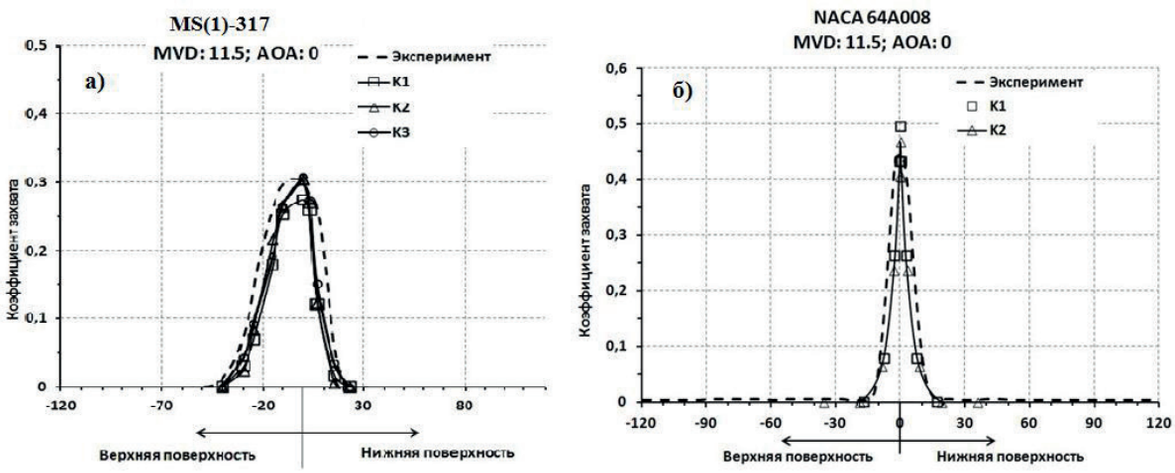


Рис. 1. Коэффициент захвата на профилях MS(1)-317 и NACA-64A008

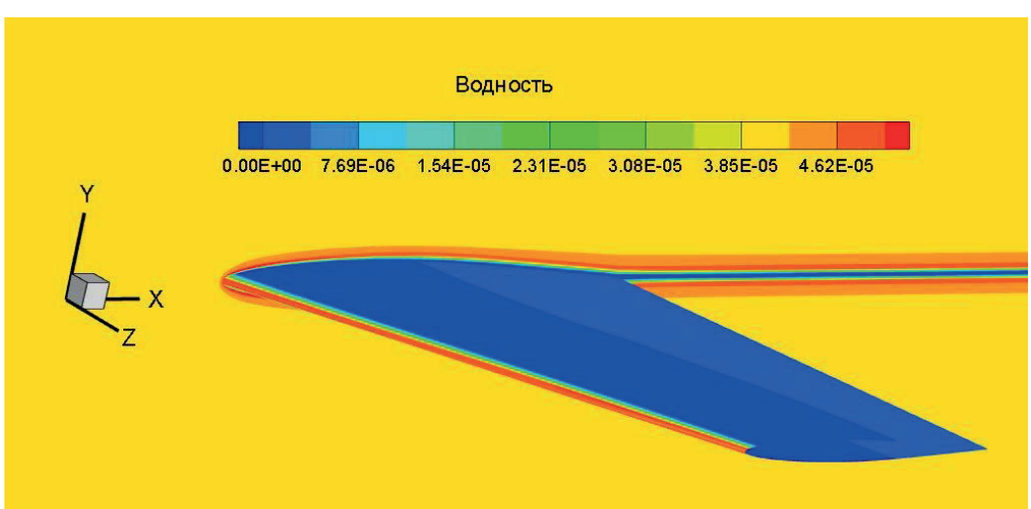


Рис. 2. Поле водности на крыле и вокруг профиля NACA 64A008 при K = 2

Литература

3. *Волков А.В.* Методы решения сеточных уравнений конечно-элементной аппроксимации пространственных течений // Ученые записки ЦАГИ. 2010. Т. XLI, № 3, С. 52–68.
4. *Bassi F., Rebay S., Mariotti G., Pedinotti S., Savini M.* A high-order accurate discontinuous finite element method for inviscid and viscous turbomachinery flows // Fluid Dynamics and Thermodynamics–Technologisch Institut, Antwerpen, Belgium, 1997, pp. 99–108.

УДК 533.69.01

Учет деформаций изгиба и кручения при расчете аэродинамических характеристик воздушного винта

***А.А. Черненко*[1], *А.В. Лысенков*[1,2]**

[1] Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2] Центральный аэрогидродинамический институт им Н.Е. Жуковского

Как показывают современные тенденции развития авиационных двигателей, в будущем использование турбовинтовых двигателей и двигателей с открытым ротором позволит получить бóльшую топливную эффективность по сравнению с современными ТРДД. Для проектирования воздушных винтов таких двигателей все чаще используются вычислительные методы. С развитием технологий и вычислительных методов от результатов вычислительного эксперимента требуется все большая точность получаемых данных. Известно, что деформации лопасти воздушного винта влияют на его тяговые и моментные характеристики [1].

В данной работе разрабатывается метод, позволяющий учесть деформации изгиба и кручения при расчете аэродинамических характеристик воздушного винта. Расчет деформации проводится с использованием упрощенного метода, основанного на решении уравнения упругой линии балки. Расчет аэродинамических характеристик воздушного винта производится с использованием пакета прикладных программ EWT – ЦАГИ [2, 3]. В результате получаются значения тяги при различных оборотах воздушного винта с учетом и без учета деформаций. Результаты расчета сравниваются с экспериментальными данными, полученными в аэродинамической трубе ЦАГИ.

Литература

1. *Александров В.Л.* Воздушные винты. М.: государственное издательство оборонной промышленности, 1951.
2. *Босняков С.М.* Концепция программного продукта EWT-ЦАГИ и основные этапы её развития // Труды ЦАГИ. №2671, М. 2007.
3. *Kazhan E.V.,Kursakov I.A., Lysenkov A.V.* Multigrid accelerated numerical methods based on implicit scheme for moving control volumes for WT flows simulating 13th RUSSIAN-CHINESE CONFERENCE Fundamental Problems of Aircraft Aerodynamics, Flight Dynamics, Strength and Flight Safety".

УДК 51-72

Байесовская локализация дрейфующего объекта при наличии стохастического воздействия внешней силы

***А.А. Жиркина*[1], *Я. Пико*[2]**

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2] Schlumberger Moscow Research Center

В данном докладе поднимается вопрос применения и сравнения различных байесовских фильтров для решения задачи локализации тела, несомого турбулентным однофазным потоком. В качестве объекта изучения рассматривается устройство, оборудованное инерциальными сенсорами. Для имитации движения объекта в потоке можно воспользоваться уравнением, похожим на уравнение Лонжевена для броуновского движения частицы [3].

$$m\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_{drag} + \vec{\xi}(t). \qquad (1)$$

Уравнение (1) показывает, что скорость $\vec{v}$ движения объекта определяется воздействием силы $\vec{F}_{drag}$, отвечающей за сопротивление потока, и случайной силы $\vec{\xi}(t)$, отвечающей за «подталкивания» тела потоком. В нашем случае предполагаем, что $\vec{\xi}(t)$ распределена нормально, а сила сопротивления может быть найдена как

$$\vec{F}_{drag}(t) = CS\frac{\rho\left|\vec{v}_{flow}(t)-\vec{v}(t)\right|\left(\vec{v}_{flow}(t)-\vec{v}(t)\right)}{2}. \tag{2}$$

Здесь ρ – плотность жидкости, C – коэффициент сопротивления, а S – площадь миделя. При этом скорость турбулентного потока $\vec{v}_{flow}(t)$ может быть представлена как $\langle\vec{v}_{flow}\rangle+\delta(t)$, где $\langle\vec{v}_{flow}\rangle$ – средняя скорость потока (может зависеть от положения объекта), а $\delta(t)$ – нормально распределённая пульсационная скорость. [1] Таким образом, итоговое ускорение, зарегистрированное акселерометром внутри объекта, определяется из следующего стохастического дифференциального уравнения:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \underbrace{\frac{CS\rho}{2m}}_{\mathrm{A}}\left|\vec{v}_{flow}(t)+\delta(t)-\vec{v}(t)\right|\left(\vec{v}_{flow}(t)+\delta(t)-\vec{v}(t)\right)+\vec{\varepsilon}(t). \tag{3}$$

Для определения скорости и координаты объекта на основе данных акселерометра необходимо применить к этим данным процедуру фильтрации. Эту задачу решает семейство предикторно-корректорных байесовских фильтров [2]. Функцией этих фильтров в задаче навигации является прогноз вектора состояния объекта x_t на основе зашумлённых данных с инерциальных датчиков (эти данные используются в качестве параметров управления u_t) и его коррекция на основе информации от дополнительных сенсоров z_t (4-5). η – нормировочный множитель.

$$\begin{aligned}\hat{p}(x_t) &= \int p(x_t \mid u_t, x_{t-1})\,p(x_{t-1}),\\ p(x_t) &= \eta\, p(z_t \mid x_t)\,\hat{p}(x_t).\end{aligned} \tag{4 – 5}$$

Рассмотрены два основных класса байесовских фильтров: параметрические (фильтр Калмана) и непараметрические (фильтр частиц). Основным отличием одного типа от другого является представление функции распределения вероятности. В случае фильтра Калмана эта функция представлена параметрически в виде нормального распределения, а в случае фильтра частиц – как выборка из этого распределения (элементы выборки и называются *частицами*).

Для сравнения работы обоих фильтров был проведён эксперимент на одномерном (т.е. скалярном) варианте уравнения (3).

На рис. 1 показаны результаты фильтрации зашумлённого ускорения со среднеквадратичным отклонением $\sigma_a = 0.002\ м/с^2 = 0.4a_{\max}$ и коррекцией по координате каждые 10 метров. Для корректной оценки точности каждого фильтра введём функционал

$$\Phi(t) = \int_0^t \left|\vec{v}_{actual}(\tau)-\vec{v}_{filtered}(\tau)\right| d\tau\,. \tag{6}$$

Для идеального фильтра значение этого функционала $\Phi(t)\equiv 0$, для расчётов на рис. 1 $\Phi_{Kalman}(T)=2.18$, $\Phi_{Particle}(T)=1.79$. Таким образом, оказалось, что в рамках

данной задачи при достаточно большом количестве частиц фильтр Калмана будет показывать результаты хуже, чем фильтр частиц. Кроме этого, к преимуществам фильтра частиц стоит отнести независимость от начальных условий и мультимодальность. Однако в тех ситуациях, когда проведение большого числа расчётов нежелательно, ограничение количества частиц в целях уменьшения вычислительной сложности может привести к неэффективности фильтра частиц. В этом случае рекомендуется использовать параметрические фильтры.

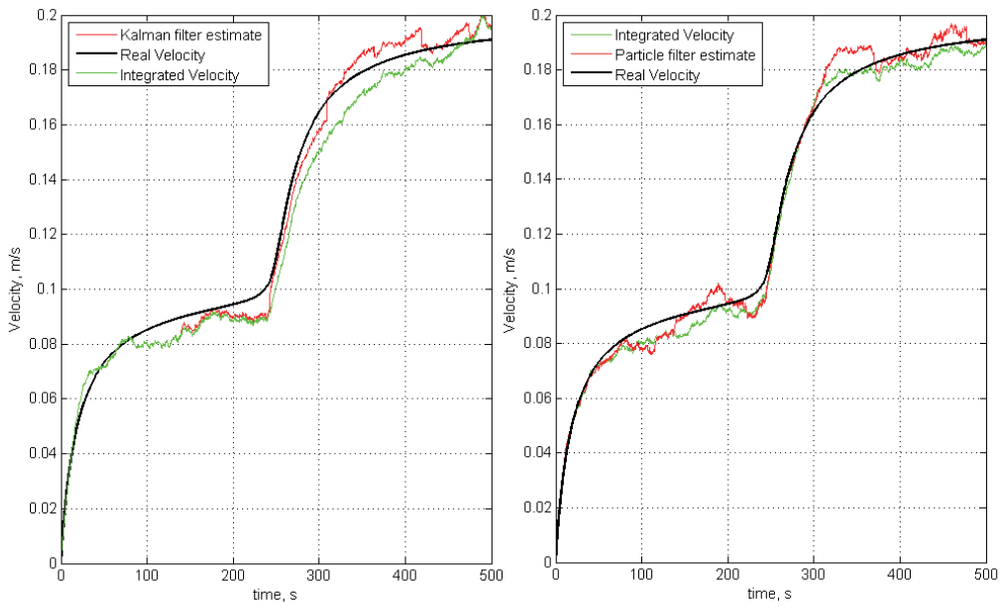


Рис. 1. Сравнение фильтров

Литература

1. *Belotserkovskii O.M., Oparin A.M. and Chechetkin V.M.* Turbulence: New Approaches. Cambridge International Science Pub., 2005.
2. *Thurn S., Burgard W. and Fox D.*. Probabilistic Robotics. The MIT Press, 2006.
3. *Zwanzig R.* Nonequilibrium Statistical Mechanics. Oxford University Press, 2001.

УДК 519.63

Сравнительный анализ сходимости численных методов при расчёте температуры на поверхности летательного аппарата

С. Бахнэ

Московский физико-технический институт (государственный университет)

В данной работе проведены пространственные аэродинамические расчёты ЛА с использованием пакета EWT ЦАГИ [1], расчётный модуль ZEUS [2]. Решались уравнения RANS с замыканием моделями турбулентности SST [3], [4] и Spalart-Allmaras [5]. Используется метод конечного объёма, реализованный на многоблочной структурированной расчетной сетке. В качестве базиса используется метод Годунова [6], [7], Основные соотношения выписаны в работах [8], [9]. Особенности программной реализации осуществлены в работе [10]. Также были использованы различные реконструкции функций в ячейке. Во-первых, оригинальный метод Годунова, использующий постоянное распределение функций внутри ячейки, обладающий первым порядком точности [6], [7]. Во-вторых, оригинальная модификация MUSCL-V [11] монотонизатора MUSCL[12] (далее TVD), использующая линейное распределение функций внутри ячейки. В-третьих, оригинальный подход WENO [13] [14], в данной

работе используется реализация, имеющая второй порядок точности по пространству, класс A [15] (далее MPWENO5). Монотонизация решения осуществляется с помощью алгоритма из работы [16] [17], особенности реализации описаны в работах [18], [19].

Для установления по времени используется неявная схема, описанная в работах [20] [21], особенности реализации [9], [22]. Описание реализации моделей турбулентности SST и Spalart-Allmaras осуществлено в работе [9]. Было проведено несколько расчётных серий:

1) Двумерный расчёт профиля NACA0012 на дозвуковом и трансзвуковом режимах. В данной расчётной серии было уделено внимание зависимости результатов от угла атаки, от осреднения, от экстраполяции значений на узлы ячеек, от числа Маха, выбору оптимального численного метода. Показано, что отличия значений при обработке с экстраполяцией и без неё несущественны. Аналогичный результат получился для осреднённых и мгновенных полей. В дальнейшем расчёты будут проводиться на трансзвуковом режиме, так как он представляет собой больший интерес с точки зрения практических задач и по причине роста абсолютной величины ошибки.

2) Двумерный расчёт профиля NACA0012 на трансзвуковом режиме и более подробных сетках. В данной серии также исследовался вышеупомянутый метод Годунова. Также была рассмотрена зависимость величины ошибки от использования локального шага по времени. Оказалось, что для метода MPWENO5 отсутствует сходимость численной ошибки определения температуры по отношению к температуре торможения по шагу расчётной сетки. Несмотря на это величина ошибки метода MPWENO5 существенно меньше по абсолютной величине, чем остальных рассматриваемых методов, что в свою очередь склоняет выбор при расчёте температуры в его сторону.

3) Двумерный расчёт двухконтурной мотогондолы в осесимметричной постановке. Исследовались методы TVD и MPWENO5. Было показано, что существует сходимость ошибки определения по шагу расчётной сетки температуры в области торможения для обоих методов. Для метода MPWENO5 также существует сходимость ошибки определения давления, величина которой существенно выше величины ошибки вычисления температуры, это означает, что определение давления в точке торможения является такой же проблемой для используемых методов и моделей турбулентности как определение температуры. Этот эффект игнорируется, так как в большинстве практических расчётов определяется интегральный коэффициент давления по всей поверхности тела. Таким образом, ошибка, связанная с определением давления в зоне торможения, становится незначительной. Во-вторых, величина ошибки метода MPWENO5 на всех сетках, кроме грубой, на порядок меньше ошибки метода TVD.

4) Трёхмерный расчёт двухконтурной мотогондолы. Было установлено, что величина относительной ошибки вычисления температуры и давления в области торможения значительно больше, чем в двумерной постановке. При этом отношение между ошибкой вычисления температуры и давления сохраняется для обоих методов, то есть величина ошибки по температуре для метода MPWENO5 существенно меньше величины ошибки по давлению, а для метода TVD наоборот. В отличие от двумерного расчёта относительная ошибка вычисления температуры для метода MPWENO5 не сходится по шагу расчётной сетки.

Кроме того, в работе была проведена аналитическая оценка самого подхода. Для этого была проведена серия расчётов обтекания цилиндра и сопоставления результатов с аналитическим приближением.

Литература

1. *Босняков С.М.* Концепция программного продукта EWT-ЦАГИ и основные этапы её развития / *Труды ЦАГИ*. 2007, № 2671, С. 3–19.
2. *Михайлов С.В., Власенко В.В.* Программа ZEUS для расчёта нестационарных течений в рамках подходов RANS и LES // Материалы XX школы-семинара "Аэродинамика летательных аппаратов". посёлок Володарского. 2009. С. 40–41.
3. *Menter F.,* Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications / *AIAA-Journal*. 1994. V. 32, N. 8. P. 269–289.
4. *Menter F., Langtry R., Likki S., Suzen Y., Huang P.* A correlation based transition model using local

variables Part 1, Part 2 // ASME TURBO EXPO. Vienna, Austria. 2004.
5. *Allmaras S.R., Johnson F.T., Spalart P.R*. Modifications and clarifications for the implementation of the Spalart-Allmaras turbulence model // Seventh International Conference on Computational Fluid Dynamics. Big Island. 2012. P. 1–11.
6. *Годунов С.* Разностный метод численного расчета разрывных решений уравнений гидродинамики // математический сборник. 1959. Т. 47(89), № 3. С. 271–306.
7. *Годунов С., Забродин А., Иванов М., Крайко А., Прокопов Г.* Численное решение многомерных задач газовой динамики. Москва: Наука, 1976.
8. *Власенко В.В.,* "О математическом подходе и принципах построения численных методологий для Пакета Прикладных Программ EWT-ЦАГИ," *Труды ЦАГИ*, № 2671, 2007. С.20–85.
9. *Власенко В., Кажан Е., Матяш Е., Михайлов С., Трошин А.* Численная реализация неявной схемы и различных моделей турбулентности в расчетном модуле ZEUS / *Труды ЦАГИ*. 2015. № 2735. С. 5–49.
10. *Михайлов С.В.* Объектно-ориентированный подход к созданию эффективных программ, реализующих параллельные алгоритмы расчета // Труды ЦАГИ. 2007. № 2671. С. 86–108.
11. *Матяш С.* Новый метод использования принципа минимальных приращений в численных схемах второго порядка аппроксимации // Ученые записки ЦАГИ. 2005. Т. XXXVI, № 3–4. С. 42–50.
12. *Van Leer B.* A second-order sequel to Godunov's method // Towards the ultimate conservative difference scheme. 1979.
13. *Shu C.W., Osher S.* Efficient implementation of essentially non-oscillatory shock capturing schemes. II // Journal of Computational Physics. 1989. V. 83, N. 1. P. 32–78.
14. *Shu C.W., Osher S.* Efficient implementation of essentially non-oscillatory shock capturing schemes // Journal of Computational Physics. 1988. V. 77, N. 2. P. 439–471.
15. *Zhang R., Zhang M., Shu C.W.* On the order of accuracy and numerical performance of two classes of finite volume WENO schemes // Communications in Computational Physics. 2011. V. 9, No. 3. P. 807–827.
16. *Suresh A., Huynh H.* Accurate Monotonicity-Preserving Schemes with Runge–Kutta Time Stepping // Journal of Computational Physics. 1997. V. 136, N. 1. P. 83–99.
17. *Balsara D.S., Shu C.W.* Monotonicity Preserving Weighted Essentially Non-oscillatory Schemes with Increasingly High Order of Accuracy // Journal of Computational Physics. 2000. V. 160, N. 2. P. 405–452.
18. *Михайлов С., Савельев А.* Сравнение TVD и WENO схем на примере задач о переносе волнового пакета и о численной диффузии вихря // математический сборник. 2011. Т. 23, № 11. С. 99–110.
19. *Михайлов С., Савельев А., Чан Д., Нгуен Н.* Применение схемы WENO в рамках архитектуры ZEUS // Труды ЦАГИ. 2015. № 2735. С. 114–138.
20. *Иванов М., Нигматуллин Р.* Неявная схема С.К. Годунова повышенной точности для численного интегрирования уравнений Эйлера // Журнал Вычислительной Математики и Математической Физики. 1987. Т. 27, № 11. С. 1725–1735.
21. *Иванов М., Крупа В., Нигматуллин Р.* Неявная схема С.К. Годунова повышенной точности для интегрирования уравнений Навье–Стокса // ЖВМ и МФ. 1989. Т. 29, № 6. С. 888–901.
22. *Кажан Е.* Повышение устойчивости явной схемы Годунова—Колгана—Родионова локальным введением неявного сглаживателя //Ученые записки ЦАГИ. 2012. Т. XLIII, № 6. С. 66–84.

УДК 621.452.3

Расчетное исследование характеристик модели одноступенчатого осевого компрессора JT8D в мотогондоле

И.В. Воронич, В.Х. Нгуен

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Дозвуковые воздухозаборники (ВЗ) предназначены для обеспечения максимального качества потока на входе в компрессор при минимальных потерях полного давления и минимальном общем сопротивлении мотогондолы [1]. Неравномерность потока в ВЗ является ключевым параметром для оценки качества подаваемого воздушного потока, который непосредственно связан с характеристиками двигателя и влияет на его

устойчивость и экономичность. В этой связи моделирование работы компрессора в мотогондоле является актуальной задачей [2, 3].

В настоящей работе рассмотрена работа модели одноступенчатого осевого компрессора JT8D в мотогондоле с граничными условиями вращательной периодичности. Для этого модельного компрессора ранее проводилось исследование газодинамических характеристик [4] в контексте тестового эксперимента [5], было получено согласие с экспериментом по расходу массы $G_{\text{В}}$ и степени повышения полного давления вентилятором π^*_B с относительной погрешностью в основном в пределах 1% при использовании укороченных расчетных областей (не содержащих разделителя потоков и соответствующих каналов).

Геометрические модели проточной части и элементов компрессора построены с помощью пакета ANSYS BladeGen [6], геометрическая модель мотогондолы построена в пакете ANSYS DesignModeler. Для элементов компрессора в пакете ANSYS TurboGrid построены подробные блочно-структурированные расчетные сетки. Для наружной расчетной области в пакете Pointwise Gridgen построена блочно-структурированная расчетная сетка. Расчетные сетки использовались для создания соответствующих расчетных областей в ANSYS CFX, которые объединены в единую расчетную модель, рис. 1, 2. Расчеты трехмерных турбулентных течений выполнены с использованием модели турбулентности SST. Расход массы $G_{\text{В}}$ в мотогондоле не фиксировался, так как эта величина является результатом решения. Граничные условия на выходе ступени при наличии мотогондолы отличаются от варианта без мотогондолы по величине статического давления.

Основные интегральные характеристики для модели ступени компрессора в мотогондоле сравнивалась с результатами для «чистой» модели, а также с экспериментальными данными и представлены на рис. 3. Интегральные характеристики рассматриваемой ступени компрессора в обоих вариантах близки. Систематические различия имеются в величине адиабатического КПД, но эта величина не является достаточно надежной для оценки реальной эффективности компрессора. Различия в степени повышения полного давления π^*_B и степени подогорева τ^*_B незначительны, при максимальном расходе массы они составляют 1 – 2%.

Коэффициент восстановления полного давления ВЗ показан на рис. 4. Во всем диапазоне работы компрессора на режиме 70% от расчетной частоты вращения коэффициент восстановления полного давления ВЗ составляет 0,96 – 0,98. Это говорит о том, что ВЗ работает с хорошим качеством.

Для оценки влияния работы компрессора на поток в канале ВЗ был проведен анализ распределения тангенциальной и осевой составляющих скорости перед входным направляющим аппаратом (ВНА). Результат анализа показал, что в канале ВЗ абсолютная величина тангенциальной составляющей скорости мала (в пределах 0,1 м/с) – в данной конфигурации поток в ВЗ слабо закручен. Это можно объяснить спрямляющим действием ВНА. Поэтому для таких конфигураций можно не учитывать закрутку потока в ВЗ, вызванную работой компрессора.

Профили осевой составляющей скорости достаточно однородны в канале ВЗ вблизи ВНА, градиентные зоны сосредоточены в пограничных слоях на стенках. Это позволяет описывать структуру потока в ВЗ перед ВНА в таких конфигурациях как однородный профиль осевой скорости в соответствии с расходом массы.

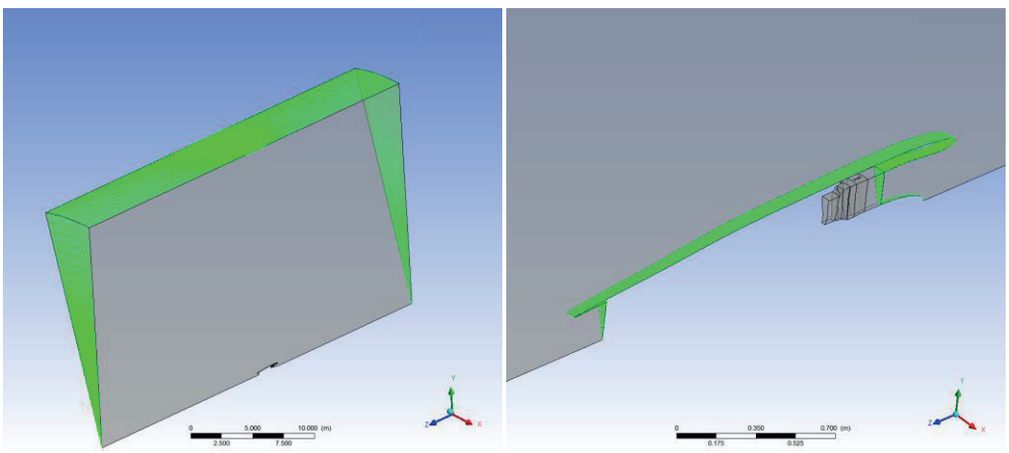


Рис. 1. Расчетная модель ступени компрессора в мотогондоле

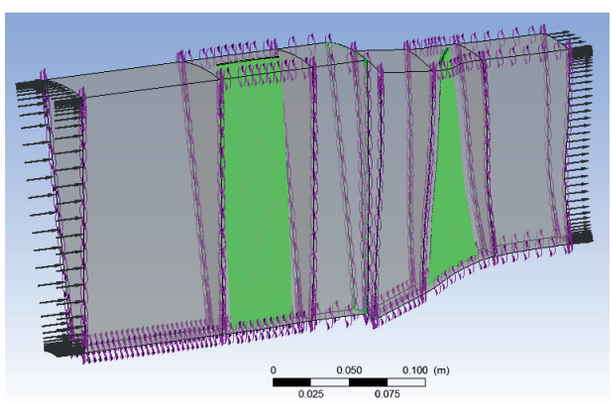


Рис. 2. Расчетная модель ступени компрессора

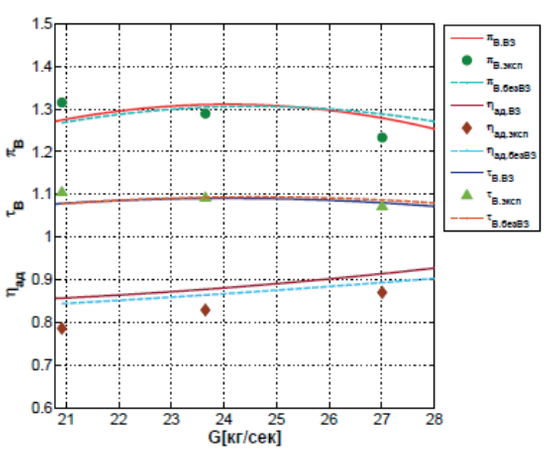


Рис. 3. Основные параметры ступени компрессора при наличии и отсутствии мотогондолы

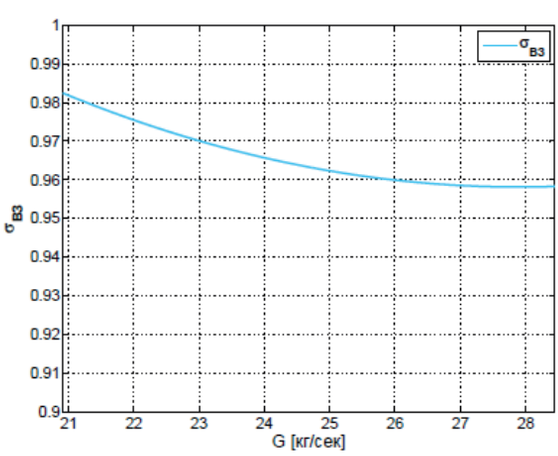


Рис. 4. Коэффициент восстановления полного давления В3 (режим 70%)

Литература

1. *Mattingly J.D., Heiser W.H., Pratt D.T.* Aircraft Engine Design. - AIAA, Inc., 2002. 679 p.
2. *Mileshin V.I.* Challenges in fan and high pressure compressor development // 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS), 2014. Paper 2014_1026.
3. *Biollo R., Benini E.* Recent advances in transonic axial compressor aerodynamics // Progress in Aerospace Sciences. 2013. V. 56. P. 1–18.

4. *Воронич И.В., Нгуен В.Х.* Моделирование характеристик осевого компрессора в контексте тестового эксперимента // Материалы 59 научной конференции МФТИ. 2016.
5. *Moore R.D., Kovich G. Tysl E.R.* Aerodynamic performance of 0.4066-scale model of JT8D refan stage // NASA TM X-3356. 1976. 156 p.
6. *ANSYS, Inc.* ANSYS Turbo system users guide. 2014.

УДК 629.735.4

Подход к моделированию обтекания несущего винта вертолета с учетом махового движения лопастей

В.А. Вершков, Б.С. Крицкий, Р.М. Миргазов

Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского (ЦАГИ)

Моделирование обтекания несущего винта (НВ) является одной из трудных и важных задач аэродинамики вертолета. Это объясняется характером обтекания лопастей НВ, которые за один оборот совершают сложное криволинейное движение одновременно в плоскости тяги и в плоскости вращения, при этом циклически изменяется угол установки лопастей.

До настоящего времени в большинстве известных расчетах, проводимых сеточными методами, не учитывалось маховое движение лопастей и циклическое управление ими. В данной работе описан алгоритм деформации сетки в локальной области для задач моделирования обтекания несущего винта вертолета на режиме горизонтального полета при наличии заданных законов махового движения и циклического управления лопастями [1, 2]. На рисунке 1 представлено максимальное отклонение узла на данном шаге по времени (б) от его положения в начальной недеформированной сетке (а) в сечении.

Помимо этого, представлена работоспособность разработанного алгоритма для решения задач аэроупругости. В частности, продемонстрировано сохранение односвязности расчетной области при изменении формы твердой. На рисунке 2 представлен пример деформации лопасти в конечный момент времени для проверки работоспособности алгоритма.

В данной работе представлены результаты тестовых расчетов аэродинамических характеристик НВ без и с учетом махового движения лопастей. Проводится сравнение коэффициентов силы тяги НВ C_T и шарнирных моментов лопастей $m_ш$.

Расчеты проводились в CFD пакете программ ANSYS CFX (Лицензия ЦАГИ №501024). Смоделировано обтекание четырехлопастного НВ радиусом 2,5 метра на режиме косого обтекания. Скорость набегающего потока составляла 85 м/с при нормальных атмосферных условиях. Винт находился под углом атаки –10˚. Для расчета движения винта без учета маховых движений использовалась нестационарная система уравнений Навье–Стокса с замыканием SST моделью турбулентности. Расчет проводился до тех пор, пока изменение максимального значения тяги винта за оборот не станет менее 1%. Для моделирования маховых движений лопасти были взяты законы управления и уравнения, описывающие угол взмаха лопасти как функцию от ее азимутального угла, полученные из эксперимента. Процедура перестроения сетки по заданному закону осуществлялась с использованием стандартных методов деформации сетки, представленных в программе ANSYS CFX. При решении нестационарных уравнений Навье–Стокса был использован дуальный шаг по времени.

Полученные результаты показывают, что учет влияния маховых движений и циклического управления лопастями влияет на характер протекания коэффициента C_T НВ за один оборот и существенно влияет на вид графика коэффициента шарнирного момента каждой лопасти $m_ш$.

Рис. 1 а) Положение узлов расчетной сетки в сечении в начальный момент времени

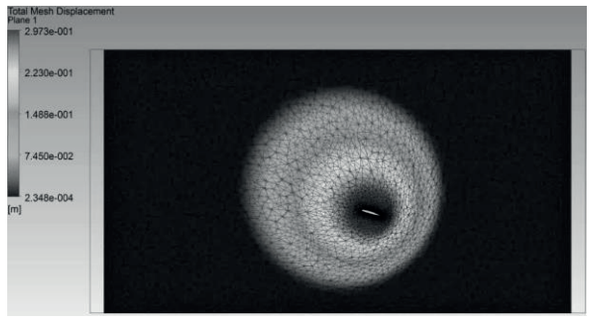


Рис. 1 б) Отклонение узлов расчетной сетки в сечении в текущий момент времени

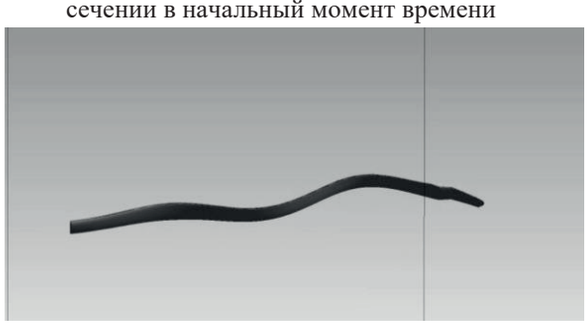


Рис. 2 а) Форма деформированной лопасти в конечный момент времени на виде сбоку

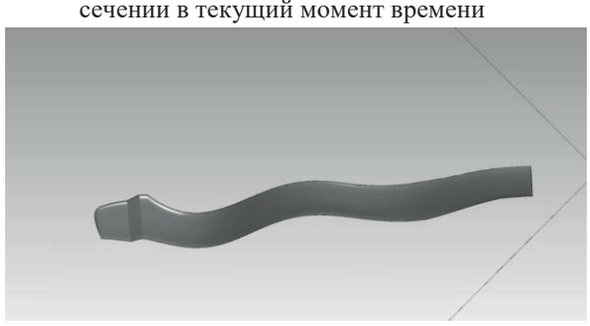


Рис. 2 б) Форма деформированной лопасти в конечный момент времени на виде сверху

Литература

1. *Вершков В.А., Крицкий Б.С., Миргазов Р.М.* Численное моделирование обтекание несущего винта вертолета с учетом циклического управления и махового движения лопастей // Материалы XXVIII научно-технической конференции по аэродинамике. 2017. С. 78.
2. *Вершков В.А., Крицкий Б.С., Миргазов Р.М.* Особенности моделирования обтекания несущего винта вертолета с учетом циклического управления и махового движения лопастей // Материалы Семнадцатой Международной школы-семинара «Модели и методы аэродинамики». 2017. С. 36.

УДК 533.6.011

Исследование влияния функции ограничителя, схем TVD и WENO на решение уравнений Навье–Стокса

***И.В. Егоров*[1,2], *Н.К. Нгуен*[1]**

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет)

[2]Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ЦАГИ)

Для численного решения уравнений Навье–Стокса используется программный код, разработанный группой учёных ЦАГИ под руководством И. В. Егорова. Программа использует разностные аналоги законов сохранения

$$\frac{Q_{i,j}^{n+1}-Q_{i,j}^{n}}{\Delta t}+\frac{E_{i+\frac{1}{2},j}^{n+1}-E_{i-\frac{1}{2},j}^{n+1}}{\Delta\xi}+\frac{G_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+1}-G_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+1}}{\Delta\eta}=0,$$

где n – номер временного слоя, i, j – индекс ячейки.

При аппроксимации конвективной составляющей векторов потоков в полуцелых узлах использована неявная квазимонотонная схема типа Годунова [1, 2] и приближённый метод Роу [3] решения задачи Римана о распаде произвольного разрыва

$$E_{i+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}\left(E(Q_L) + E(Q_R) - R(Q_{LR})\Phi\left(\varphi(\lambda_i)\right)R(Q_{LR})^{-1}(Q_R - Q_L)\right).$$

Здесь Q_L, Q_R используется схема типа TVD (minmod, Van Lee, Superbee, Van Albada) или схема WENO. В настоящей работе исследовано их влияние на решение уравнений Навье–Стокса.

Расчетное исследование реализовано в двумерном течении на острой пластине.

Численные эксперименты показывают, что схема WENO лучше всего работает. В классе схемы типа TVD схема Van Leer является лучшей. Она дает решения менее диссипативные, чем minmod и Van Albada, и также монотонные. Стоит отметить, что при использовании ограничителя Superbee мы получаем немонотонные решения.

Из анализа результатов следует, что решение, полученное с использованием ограничителя WENO, является лучшим. Этот ограничитель даёт монотонное решение и обладает минимальной диссипацией.

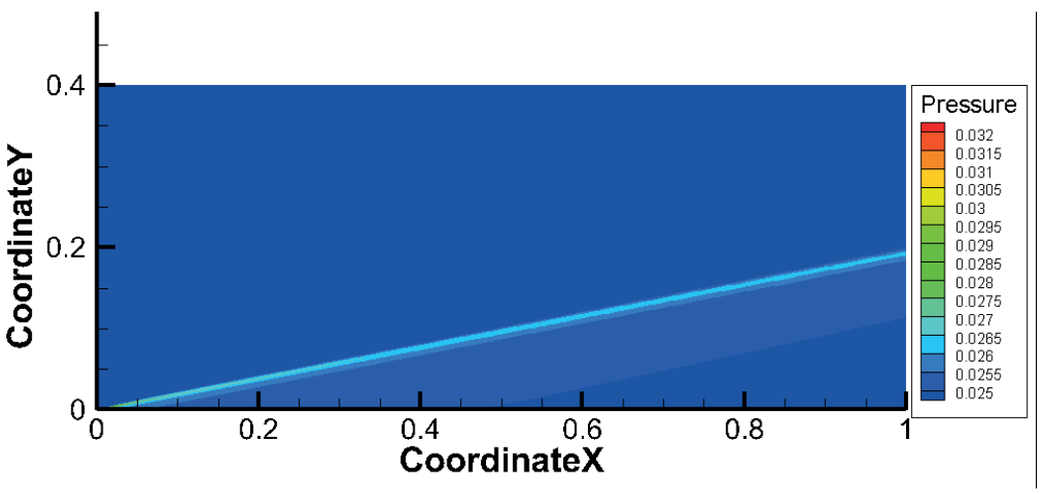


Рис. 1. Поле давления, когда безразмерное время t = 2.106, схема WENO

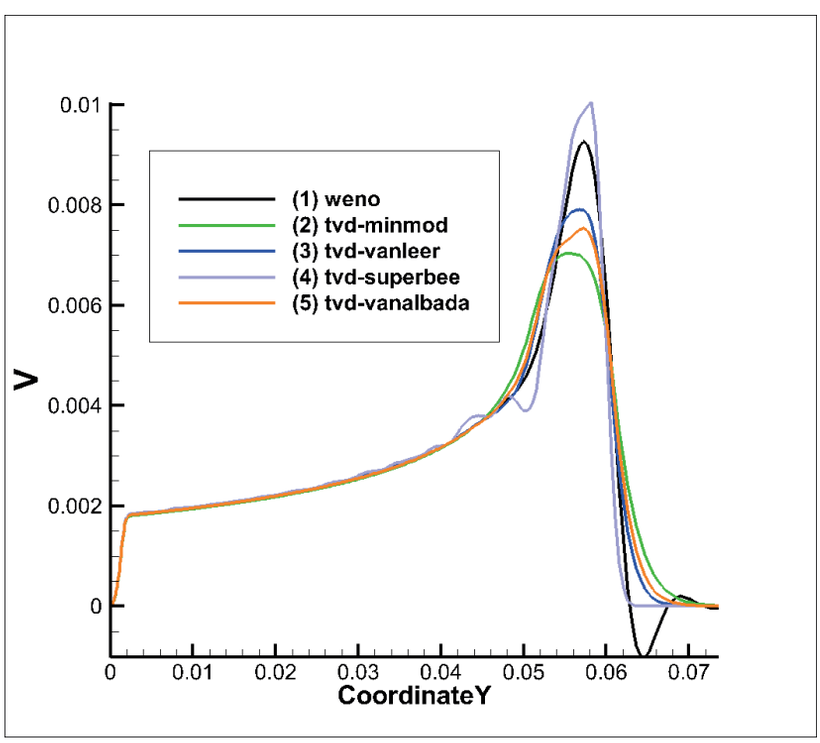


Рис. 2. Vy, x = 0.3, t = 2.106

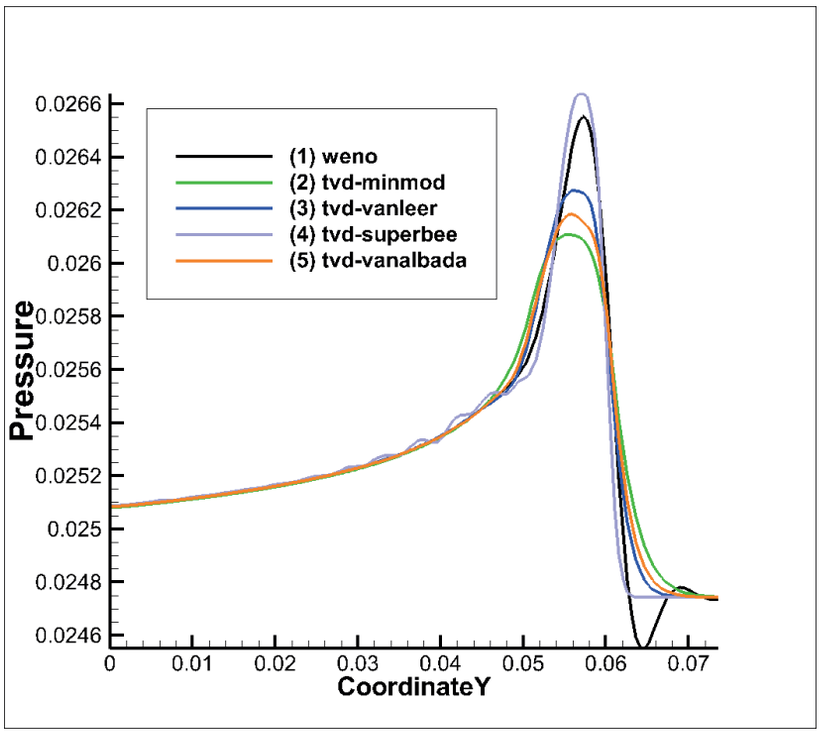


Рис. 3. Давление, x=0.3, t=2.106

Литература

1. *Годунов С.К.* Конечно-разностный метод численного расчета разрывных решений уравнений газовой динамики // Мат. сб. 1959. Т. 47. С. 271–291.
2. *Годунов С.К.*, *Забродин А.В., Иванов М.Я.,Крайко, А.Н., Прокопов Г.П.* Численное решение многомерных задач газовой динамики // Мат. сб. 1976. Т. 47. С. 271–291.
3. *Roe P.L.* Approximate Riemann solvers, parameter vectors, and difference scheme // J. Comput. Phys. 1981. V. 43. P. 357–372.
4. *Башкин В.А., Егоров И.В., Иванов Д.В.* Применение метода Ньютона к расчету внутренних сверхзвуковых отрывных течений // ПМТФ. 1997. № 1. С. 30–42.

УДК 004.932.2

Разработка методики определения параметров траекторного движения наблюдаемого объекта с использованием методов технического зрения

М.В. Недорезов

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Одним из способов посадки беспилотного летательного аппарата (БПЛА) является посадка на автомобиль с установленной на него специальной платформой. Данный способ позволяет облегчить конструкцию БПЛА за счёт отказа от размещения на нём массивных посадочных элементов (шасси, парашюта). В то же время способ требует высокоточного решения задачи прицеливания при заходе на посадку.

Решить данную задачу можно, определяя в режиме реального времени векторы положения, скорости и углы ориентации БПЛА в связанной с автомобилем системе координат. Эти величины, называемые в дальнейшем параметрами траекторного движения, можно определить при помощи методов технического зрения. Целью данной работы является разработка соответствующей методики.

Рассматриваемая методика требует установки на автомобиль двух камер, предназначенных для непрерывной съёмки БПЛА в процессе посадки, и вычислительного блока, применяемого для обработки полученных изображений в режиме реального

времени. Методы технического зрения используются для преобразования содержащейся в снимках информации о положении БПЛА в параметры траекторного движения. Отслеживая изменение этих параметров во времени, можно формировать управляющее воздействие на автопилот летательного аппарата.

Для успешного решения задачи необходим подбор элементов системы технического зрения и отработка алгоритмов нахождения траекторных параметров и взаимодействия элементов системы. Предложены два способа отработки методики – на испытательном стенде и на компьютерной модели.

Отработка методики на испытательном стенде имеет ряд существенных отличий от реальной задачи посадки. Малое расстояние до модели (порядка 5 м.) позволяет использовать камеры с низким разрешением (640 * 480 пикселей). В задаче производятся измерения относительной скорости, что позволяет в рамках испытательного стенда ограничиться перемещением модели беспилотного аппарата, не меняя положение камер.

В качестве оборудования для испытательного стенда были выбраны смарт-камеры NI1752. Отработано их взаимодействие по Ethernet-каналу с ноутбуком, выполняющим роль вычислителя. В качестве среды разработки используется Labview 2015 с модулем NI Vision. Для определения положения оптической мишени на изображении используется метод геометрического соответствия [1], основанный на обобщённом преобразовании Хафа [2]. На основании сравнения этого положения на паре снятых одновременно снимков определяются трёхмерные координаты мишени в данный момент времени [3].

Результатом текущей работы является программа, позволяющая управлять получением изображений с камер через локальную сеть и определяющая координаты выбранной оптической мишени на полученных изображениях. В дальнейшей работе упор будет сделан на устранение недостатков текущей реализации методики, а также на создание компьютерной модели.

Литература

1. *Gaurav Sharma, Sonali Sood, Gurjot Singh Gaba, Nancy Gupta* Image Recognition System using Geometric Matching and Contour Detection // International Journal of Computer Applications. 2012.V. 57, N 17. P. 48–53.
2. *Ballard D.H.* Generalising the Hough transform to detect arbitrary shapes // Pattern Recognition. 1981.V. 13, N 2. P. 111–122.
3. *Козлов В.Л., Кузьмичев И.Р.* Измеритель дальности и размерных параметров объектов на основе цифровой фотокамеры // Вестник Белорусского государственного университета. 2011. Сер.1, № 8. С. 33–38.

УДК 533.6.011.35

Исследование течений в переходных каналах различной конфигурации для обеспечения эффективного рабочего процесса в камере сгорания модельного прямоточного ВРД

А.В. Минко

Московский физико-технический институт (государственный университет)
Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова

В работе исследуется процесс течения газа в проточном тракте прямоточного ВРД с моделированием горения водородно-воздушной смеси. Модельный двигатель включает в себя воздухозаборное устройство, переходной канал, камеру сгорания и сопло. Рассматривалось несколько вариантов переходных каналов, затем для лучшей конфигурации рассчитаны течения с различным расположение, спрямляющих решёток и пилонов подачи топлива. В настоящей работе основная часть двумерных расчётов параметров течения выполнена с помощью программного пакета ANSYS. Исследования проведены с использованием различных моделей турбулентности для газа с переменной

теплоёмкостью, вязкостью и теплопроводностью. Рассмотрены различные механизмы теплоподвода, от самых простых до моделирования горения водородно-воздушной смеси детальным кинетическим механизмом [1]. Топливо подаётся в одном поясе пилонов, коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1$. Полётные параметры соответствуют полёту на высоте 20 км со скоростью набегающего потока $M = 5$. Внутри тракта двигателя температура стенки $T_w = 500$ К.

Расчёты выполнены на различных сетках, среднее число ячеек $N = 500\,000$. В качестве разностной схемы используется распадная разностная схема типа Роу (Roe-FDS) [2].

Построена оптимальная модель воздухозаборного устройства, обеспечивающая высокий коэффициент восстановления полного давления и устойчивую работу на расчётном режиме [3]. Данная модель ВЗУ исследована на запуск. Проведено сравнение различных конфигураций переходных каналов как в «холодном» расчёте, так и с теплоподводом. Рассчитаны тяга двигателя, полнота сгорания топлива и коэффициент восстановления полного давления в камере сгорания. На основе вышеперечисленных критериев выбрана наиболее удачная конфигурация переходного канала, обеспечивающая устойчивую работу камеры сгорания на расчётном режиме полёта.

Литература

1. *Dimitrov V.* I. The Maximum Kinetic Mechanism and Rate Constants in H_2-O_2 System React // Kinetic Catal. Lett. 1997. V. 2, N 1. P. 81–86.
2. *Toro E. F.* Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics, Springer-Verlag. 1999.
3. *Герман Р.* Сверхзвуковые входные диффузоры. 1960. С. 184–185.

УДК 533.6.04

Методы обучения искусственных нейронных сетей

В.В. Вышинский[1,2], А.О. Кисловский[1], В.В. Ткаченко[1]

[1] Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2] Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского

Рассмотрено применение искусственных нейронных сетей (ИНС) для аппроксимации коэффициентов аэродинамических сил и моментов летательного аппарата, опираясь на множество шаблонов, рассчитанных заранее [1]. Данные задачи относятся к классу задач обучения с учителем, что предполагает наличие набора данных, содержащих информацию об объекте (входной вектор **p**) и его характеристиках (вектор ответов **t**). Под задачей обучения, понимается определение соответствующего аэродинамического коэффициента компоновки летательного аппарата. Мера обучения $F = mse = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(t_i - a_i)^2$ – сумма квадратов отклонений предсказанного значения a_i от реального t_i, а само обучение производится на данных, полученных численными методами аэродинамического расчёта. В работах [2, 3] описан алгоритм, позволяющий отобразить трёхмерную компоновку летательного аппарата на вектор размерности 100, общий вид которой представлен на рисунке 1.

Классическим алгоритмом обучения, позволяющим решать большое количество прикладных задач, является метод обратного распространения ошибки (Backpropagation) [4]. Однако, несмотря на простоту реализации, обучение с использованием данного алгоритма на практике занимает большое время. Существуют два подхода к ускорению алгоритма. Первый включает в себя разработку эвристических методов, заключающихся в изменении момента и скорости обучения, а также параметров ИНС. Второй заключается в применении методов численной оптимизации, например, метод сопряженных градиентов и алгоритм Левенберга – Марквардта. Данные алгоритмы, в свою очередь, могут быть

названы алгоритмами обратного распространения, так как соответствующие градиенты высчитываются, начиная с последнего слоя. Различия между ними заключаются в том, как используются полученные величины для обновления весовых коэффициентов ИНС.

В настоящей работе рассмотрены алгоритмы эластичного распространения (Resilient backpropagation), алгоритм Левенберга – Марквардта (Lavenberg-Marquardt algorithm) и метод сопряженных градиентов. (Conjugate gradient algorithm). Для тестирования данных обучающих алгоритмов была создана трехслойная нейронная сеть (входной слой 100 нейронов, скрытый – 15, выходной – 1). Обучение производилось на 5000 компоновках.

Алгоритм эластичного распространения использует только знак частной производной $\frac{\partial E^{(t)}}{\partial w_{ij}}$ по всем паттернам и в зависимости от её знака обновляет каждый вес. $w_{ij}^{(t+1)} = w_{ij}^{(t)} + \Delta w_{ij}^{(t)}$ на слое *t*. Здесь

$$\Delta w_{ij}^{(t)} = \left\{ -\Delta_{ij}^{(t)}, \frac{\partial E^{(t)}}{\partial w_{ij}} > 0;\ +\Delta_{ij}^{(t)}, \frac{\partial E^{(t)}}{\partial w_{ij}} < 0;\ 0, \frac{\partial E^{(t)}}{\partial w_{ij}} = 0 \right\},$$

$$\Delta_{ij}^{(t)} = \left\{ \eta^{+}\Delta_{ij}^{(t)}, \frac{\partial E^{(t)}}{\partial w_{ij}} \frac{\partial E^{(t-1)}}{\partial w_{ij}} > 0;\ \eta^{-}\Delta_{ij}^{(t)}, \frac{\partial E^{(t)}}{\partial w_{ij}} \frac{\partial E^{(t-1)}}{\partial w_{ij}} < 0 \right\}, \text{ где } 0 < \eta^{-} < 1 < \eta^{+}.$$

Алгоритм Левенберга–Марквардта создавался для решения задач о наименьших квадратах, для которых матрица Гессе может быть записана в виде $H = J^T J$, а градиент – $g = J^T e$, где J – матрица Якоби, содержащая первые производные ошибок относительно весов и смещений, e – вектор ошибки ($e = (t - a)$). Данный алгоритм минимизирует функцию, совершая шаг $x_{k+1} = x_k - [J^T J + \mu I]^{-1} J^T e$, где I – единичная матрица. При $\mu = 0$ метод представляет метод Ньютона, а когда значение параметра μ велико – метод градиентного спуска с небольшим шагом.

В методе сопряженных градиентов первый шаг делается в сторону отрицательного градиента $p_0 = -g_0$, где $g_k \equiv \nabla F(x)\big|_{x=x_k}$. Значение функции изменяется на $x_{k+1} = x_k + \alpha_k p_k$, где параметр α_k – шаг обучения. Следующий шаг делается в направлении $p_k = -g_k + \beta_k p_{k-1}$, где $\beta_k = \frac{\Delta g_{k-1}^T g_k}{\Delta g_{k-1}^T p_{k-1}}$. Итерационный процесс повторяется до достижения минимума функции.

Для приведенных алгоритмов сравнивалось время обучения на одинаковых данных, а также его качество (Параметр R есть отношение выхода нейронной сети к точному ответу).

Выбор алгоритма для обучения ИНС, как и выбор её топологии, параметров обучения не имеет единственного решения. Рассмотренные в работе алгоритмы показывают высокую эффективность ИНС в задачах определения аэродинамических характеристик. Обучение ИНС на данных трубного и лётного экспериментов позволяет добиться высокой точности определения аэродинамических характеристик летательных аппаратов. Данный подход позволяет использовать накопленный вычислительный и экспериментальный материал для повышения точности работы аппроксиматора.

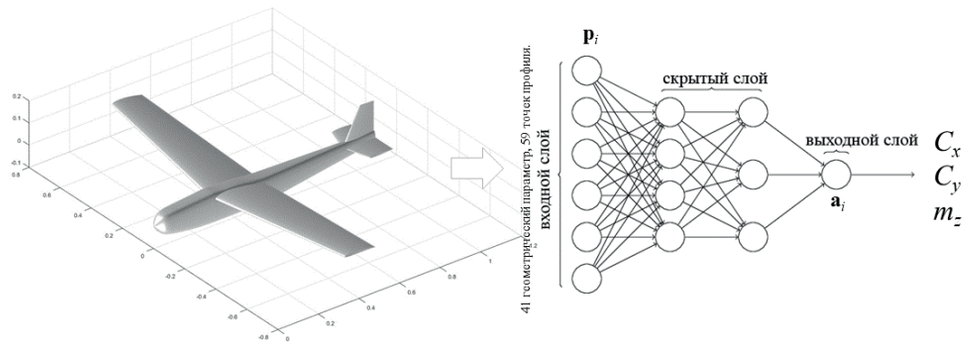
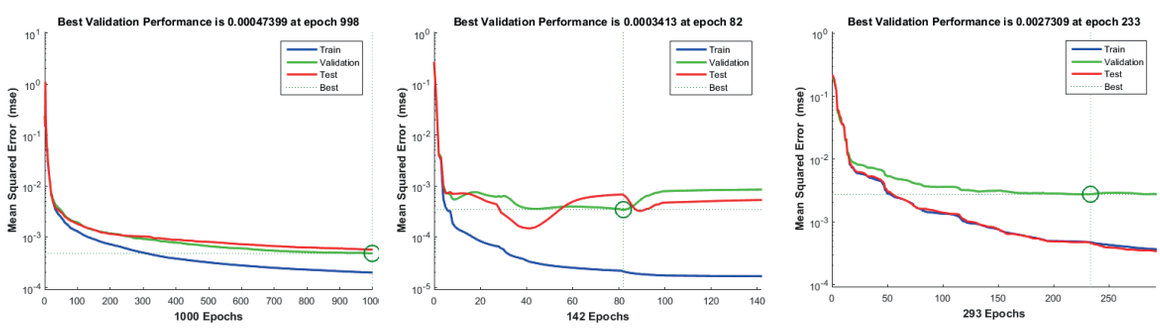


Рис. 7. Общий вид рассматриваемых компоновок летательных аппаратов (размерность в метрах), поверхность которых отображается на входной вектор нейронной сети

Таблица 1

Результаты обучения ИНС различными алгоритмами

Алгоритм	Время обучения	R
Эластичного распространения	2:08	0.99446
Левенберга – Марквардта	2:39	0.99887
Сопряженных градиентов	0:03	0.99798



а) б) в)

Рис. 2. Зависимость квадрата ошибки ИНС от эпохи а) алгоритм эластичного распространения; б) алгоритм Левенберга–Марквардта; в) метод сопряженных градиентов

Литература

1. *Kislovskiy A. and Vyshinsky V.* Quick aerodynamic design of micro air vehicles // International micro air vehicle conference and flight competition 2017, Toulouse, France, 2017, pp. 229–234.
2. *Вышинский В.В., Кисловский А.О., Колчев С.А.* Упрощенная математическая модель компоновки малоразмерного летательного аппарата // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2016. Т. 19. №. 6.
3. *Вышинский В.В., Кисловский А.О.* Генератор компоновок малоразмерного летательного аппарата // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2016. Т. 19. №. 6.
4. *Demuth H. B.* [*et al.*]. Neural network design. Martin Hagan, 2014.

УДК 533.6.011

Влияние вихрей Гёртлера различной интенсивности на теплообмен при гиперзвуковом обтекании угла сжатия

П.В. Чувахов

Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского
Московский физико-технический институт (государственный университет)

При разработке систем теплозащиты элементов управления авиакосмической техники (щитков, элевонов) неизбежно возникает фундаментальная проблема сверхзвукового обтекания угла сжатия. Отрыв потока и его последующее присоединение не только порождают на отклонённой поверхности области усиленного теплообмена, но и создают там благоприятные условия для формирования продольных вихрей Гёртлера. Основным источником вихрей, определяющим также их интенсивность, являются неровности обтекаемой поверхности. Усиливаясь в области присоединения, вихри порождают значительные поперечные колебания теплового потока с амплитудами до 100% от его средней величины. Присутствие вихрей также вызывает повышение среднего уровня теплообмена, что обычно связывают с переходным режимом течения в области присоединения. Однако в [1] численным путём показано, что так может быть и в исходно ламинарном течении. Похожий эффект наблюдался в [2]. В продолжение [1], в настоящей работе выполнено более детальное исследование влияния вихрей Гёртлера различной интенсивности на теплообмен в области присоединения при гиперзвуковом обтекании угла сжатия, расширяющее сделанные ранее выводы. Постановка расчётной задачи соответствует [1]: величина угла сжатия $\alpha = 15°$, расстояние от острой передней кромки до линии излома $L = 50$ мм, число Маха $\mathrm{M}_\infty = 8$, число Рейнольдса $\mathrm{R}e_L = \rho_\infty U_\infty L/\mu_\infty \approx 3.7 \times 10^5$, температура торможения $T_0 \approx 754$ K, температурный фактор $T_w/T_0 \approx 0.39$. Анализируется величина безразмерного коэффициента теплообмена, полученная в расчётах:

$$St = \frac{L}{Re_L \mathrm{Pr}(T_0 - T_w)} \times \frac{\mu_w}{\mu_\infty}\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_w.$$

Расчёты выполнены на суперЭВМ с помощью собственного пакета прикладных программ HSFlow (ЦАГИ, МФТИ, см. детали в [1]). Все поля течений получены методом установления равномерного потока к стационарному состоянию. Моделирование вихрей Гёртлера проходит в два этапа: 1) расчёт стационарного двухмерного поля течения; 2) его равномерное дублирование в поперечном направлении z от $z_{min} = 0$ до $z_{max} = \lambda$, где $\lambda \approx 3.1$ мм — длина волны вихрей Гёртлера, наблюдаемая в эксперименте ЦАГИ в ударной аэродинамической трубе УТ-1М (моделируется единственная пара вихрей). Вихри порождаются искусственно путём ввода стационарных возмущений в пограничный слой с помощью специального граничного условия

$$(\rho v)'/(\rho v) = \epsilon \times \sin\left(\pi \frac{x - x_0}{x_1 - x_0}\right) \sin\left(2\pi \frac{z - z_{min}}{z_{max} - z_{min}}\right),$$
$$z_{min} = 0, z_{max} = \lambda, x_0 = 0.1L, x_1 = 0.13L, y = y_w = 0, \epsilon = 0.01.$$

Используются расчётные сетки $600 \times 300 \times 23$ узла. Граничные условия стандартные. Подробное описание постановки задачи и верификация используемых методов приведены в [1].

На рис. 1 представлен общий вид течения – поле числа Маха. В продольном сечении a) наблюдается отрывная область. Инициатор возмущений расположен перед сечением b). Формирование вихрей Гёртлера начинается на линии отрыва. Наибольшее усиление вихрей происходит в области присоединения (сечения c – d), где большое значение кривизны линий тока сохраняется на протяжённом участке течения.

Рис. 2 демонстрирует влияние интенсивности начальных возмущений (и как следствие, влияние интенсивности вихрей Гёртлера) на среднюю по размаху z величину

$St(x,z)$ — $St_{avgZ}(x)$. Слабые вихри ($\varepsilon < 2 \times 10^{-3}$) практически не влияют на $St_{avgZ}(x)$. С ростом интенсивности вихрей их влияние проявляется – кривая $St_{avgZ}(x)$ монотонно растёт с ростом ε. Точка соответствующего максимума движется сначала вниз по потоку — влияние вихрей постепенно проявляется в невозмущённом течении. Далее ($\varepsilon > 0.004$) эта точка движется вверх по потоку к линии присоединения, что, по-видимому, соответствует более быстрому приближению вихрей к стенке. Рис. 3 демонстрирует насыщение по степени влияния величины ε на поведение $St_{avgZ}(x_m) = \max\left(St_{avgZ}(x)\right)$ и $\max(|St(x_m,z) - St(x_m)|)$.

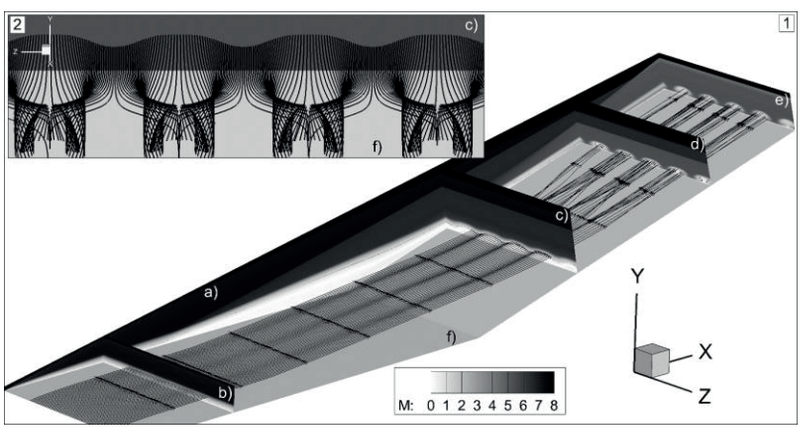


Рис.1. Поле числа Маха в ряде сечений a) – f), f – стенка. 1 – общий вид, 2 – вид из сечения e)

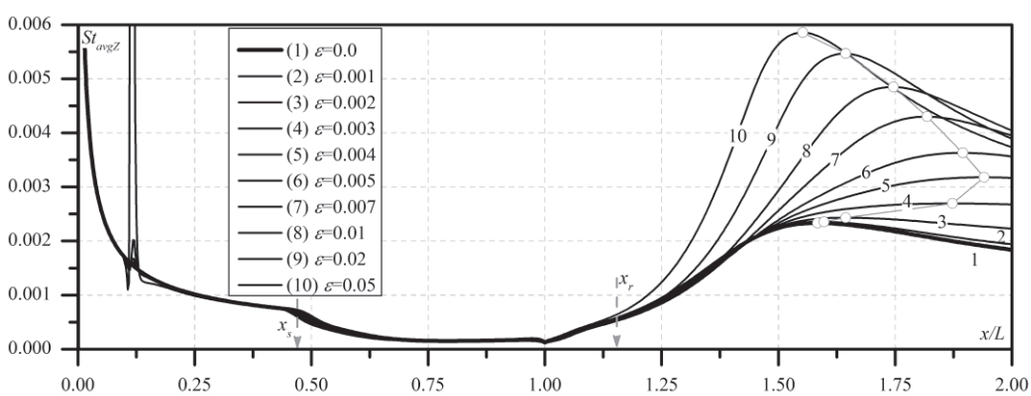


Рис.2. Распределение $St_{avgZ}(x)$, осреднённого в поперечном направлении z при различных интенсивностях вдува–отсоса ε. Серая линия соединяет максимумы $St(x)$. x_s и x_r – продольные координаты линии отрыва и линии присоединения

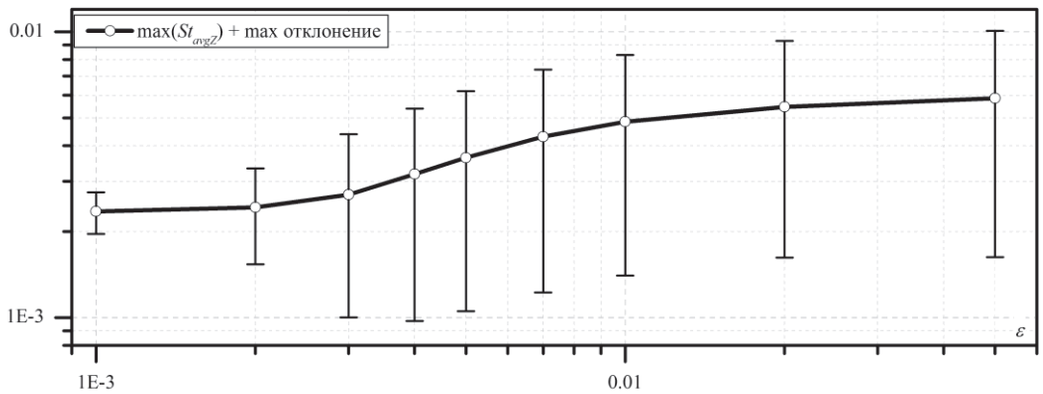


Рис.3. Влияние интенсивности ε вдува–отсоса на максимум $St_{avgZ}(x)$, достигаемый при $x = x_m$, и максимальные по z отклонения от неё при x_m

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-08-00567) с использованием вычислительных ресурсов федерального центра коллективного пользования НИЦ «Курчатовский институт», http://ckp.nrcki.ru.

Литература

1. *Chuvakhov P.V., Egorov I.V., Olivier H., Roghelia A.* Joint influence of high entropy layer and Goertler vortices on heat transfer in supersonic compression ramp flow // Computational Thermal Sciences: An International Journal. 2016. V. 8. No. 6. P. 543–553. doi:10.1615/computthermalscien.2016018947.
2. *Sivasubramanian J., Fasel H.* Direct numerical simulation of a turbulent spot in a cone boundary-layer at Mach 6 // 40th Fluid Dynamics Conference and Exhibit. 2010. Doi:10.2514/6.2010-4599.

УДК 532.526.3

Оптимизация внешней поверхности мотогондолы ТРДД с учетом ламинарно-турбулентного перехода

Е.С. Матяш, А.А. Савельев, А.И. Трошин

Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского

В настоящее время основным средством решения практических задач вычислительной аэродинамики остаются расчеты на базе системы уравнений Рейнольдса (RANS). Ожидается, что в ближайшее десятилетие такая ситуация в целом сохранится. Однако, в рамках подхода RANS корректное описание процесса ламинарно-турбулентного перехода затруднено: при осреднении системы уравнений Навье-Стокса по времени информация о линейной фазе роста возмущений в потоке теряется.

В настоящее время существует несколько подходов к определению положения ламинарно-турбулентного перехода (ЛТП), пригодных для использования совместно с расчетами на базе RANS: e^N-метод, низкорейнольдсовые модели турбулентности, LCTM (Local Correlation-based Transition Modelling) – моделирование перехода на основе эмпирических корреляций с помощью локальных формул. В данной работе выбран подход LCTM, который использует известные эмпирические формулы для определения положения ЛТП, в качестве входных данных к которым используются локальные оценки таких величин, как толщина пограничного слоя и уровень турбулентности. В настоящее время это – самый популярный в инженерной среде подход [1]. С математической точки зрения, LCTM-модель представляет собой модификацию модели турбулентности, в которой активация источниковых членов происходит по достижении критериев ЛТП, которые выражаются через вышеупомянутые формулы. В данной работе использовалась γ-модель Ментера и др. [2], которая является развитием получившей широкую известность γ-Re_θ-модели Лэнгтри и Ментера.

В докладе анализируются формулировка и область применимости γ-модели рассматривается ее реализация в пакете прикладных программ EWT-ЦАГИ [3] и верификация путем сравнения расчетов переходного пограничного слоя на пластине с комплексом ANSYS CFX. Рассматривались случаи как нулевого, так и неблагоприятного градиентов давления.

После этапа верификации γ-модель была включена в оптимизационный цикл проектирования мотогондолы (МГ) с естественным ламинарным обтеканием. Была выбрана осесимметричная постановка задачи, варьировалась форма внешних обводов мотогондолы. В докладе сравнивается результат такой оптимизации с результатом аналогичной оптимизации без учета ЛТП (см. рис.1.). Для корректности сравнения оптимальная «турбулентная» геометрия была пересчитана с учетом ЛТП, и именно такое решение сравнивалось с геометрией, полученной с учетом ЛТП изначально.

Проведена оценка снижения потерь эффективной тяги между полученными решениями. Показано, что потери эффективной тяги у оптимальной МГ с ламинаризированной обечайкой на 0.66% меньше, чем у МГ оптимизированной без учета ЛТП. При этом оптимальная длина ламинарного участка составила 30% от длины внешней обечайки. Выбор геометрии, реализующей более длинный ламинарный участок, приводит к увеличению потерь эффективной тяги по сравнению оптимальной геометрией из-за усиления скачков уплотнения. Сделаны выводы о перспективности рассмотренного подхода к решению практических задач.

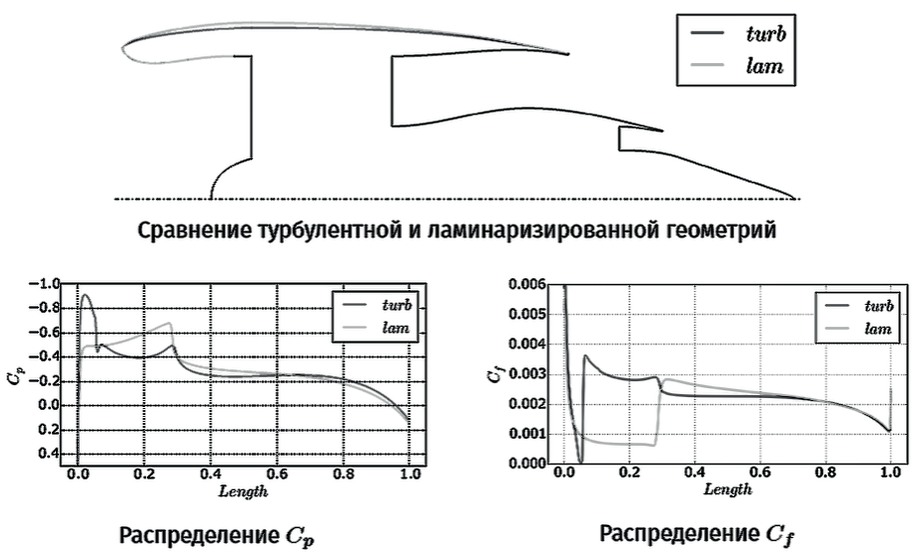


Рис.1. Сравнение результатов оптимизации с учетом (lam) и без учета (turb) ЛТП

Исследования проведены при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект № 16-38-00760).

Литература

1. *Langtry R.B., Menter F.R.* Correlation-Based Transition Modeling for Unstructured Parallelized Computational Fluid Dynamics Codes // AIAA Journal. 2009.
2. *Menter F.R., Smirnov P.E., Liu T., Avancha R.* A One-Equation Local Correlation-Based Transition Model // Flow Turbulence Combust. 2015.
3. Сборник статей «Труды ЦАГИ», вып. 2671 / под ред. В.А. Каргопольцева [и др.]. М.: Издательский отдел ЦАГИ, 2007. 212 с.

УДК 519.6

Вариационный метод построения триангуляции Делоне для неявно заданной области с внутренними границами

***Л.Н. Кудрявцева*[1,2], *В.О. Цветкова*[1], *В.А. Гаранжа*[1,2]**

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2]Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН

Рассмотрена задача построения триангуляции Делоне для областей с несколькими материалами. Для решения этой задачи необходимо было выработать алгоритм, способный для подобных областей находить границы материалов, сохраняя особенности их геометрии.

За основу был взят метод самоорганизации упругой сети. В работах [1] и [2] используется метод, где все ребра сетки интерпретируются как упругие распорки, а конечный вид – это упругая сетка в равновесном состоянии. Упругая сила действует в неявной области таким образом, что пытается вытолкнуть вершины за границу, однако если вершина выходит за пределы области, алгоритм проецирует ее на границу. Перестроение триангуляции на каждом этапе релаксации позволяет сохранить свойство Делоне. В данной же работе предлагается обобщить метод самоорганизации на области различных материалов.

Сетка представляет собой расширяющуюся среду. С двух сторон от внутренней границы вершины сетки выталкиваются из областей к границе. К вершинам, которые образуют топологическую границу областей, применен корректирующий функционал, а лишние вершины, вытолкнутые на границу, удаляются. Это позволило с приемлемой точность, находить границу области, в том числе восстанавливать относительно острые углы (рис. 1). Было получено, что в двумерном случае предложенный алгоритм показывает хорошие результаты и превосходит стандартный метод самоорганизации для области одного материала.

Также рассматривается возможность обобщения данного алгоритма для аппроксимации внутренних границ гранями ячеек Вороного.

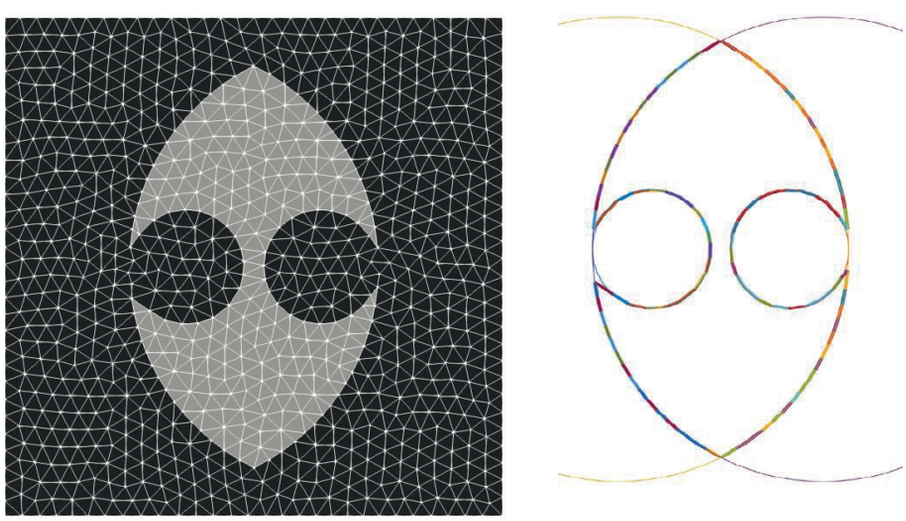


Рис. 5. Триангуляция Делоне и граница неявно заданной области, аппроксимированная гранями треугольников

Литература

1. Persson P.-O., Strang G. A simple mesh generator in MATLAB // SIAM Rev. 2004. V. 46. N 2. P. 329–345.

2. Гаранжа В.А., Кудрявцева Л.Н. Построение трехмерных сеток Делоне по слабоструктурированных ипротиворечивым данным // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2012. Т. 52. № 3. С. 499–520.

Секция прочности летательных аппаратов

УДК 629.7.018

Совершенствование методик проведения частотных испытаний при использовании электродинамических вибровозбудителей

А.А. Фомичев

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Частотные – испытания это один из важнейших этапов сертификационных испытаний летательных аппаратов. Они представляет собой количественное измерение результата воздействия колебательной силы на конструкцию. Результатом наземных частотных, или по-другому – резонансных испытаний, является информация о собственных тонах упругих колебаний конструкции, а именно список таких тонов в определенном диапазоне частот, для каждого из которых должны быть определены модальные характеристики.

Результаты наземных частотных испытаний широко используются во всех областях аэроупругости.

Основным методом проведения частотных испытаний в отечественной практике является метод фазового резонанса. Этот метод заключается в том, что в рассматриваемом диапазоне частот, пошаговым изменением частоты и подбором места, величины и фазы прикладываемой силы выделяется конкретный тон колебаний.

Колебания объекта на заданной частоте возбуждаются при помощи одного или нескольких электродинамических вибровозбудителей, прикрепленных к объекту посредством специализированных гибких тяг, а ускорения (перегрузки) фиксируются при помощи акселерометров, закрепленных на объекте исследования.

Для определения модальных характеристик испытываемого объекта предназначены электродинамические вибровозбудители, создающие переменную силу в результате взаимодействия проводника, по которому протекает переменный ток, с постоянным магнитным полем.

Одной из проблем проведения частотных испытаний является необходимость, в ряде случаев, применять датчики скорости, которые обладают значительной массой и нуждаются в сложных системах крепления. В ряде расчетов необходимо считать некий датчик закрепленным непосредственно в точке возбуждения, что снижает точность расчета. Этого можно избежать, если определять скорость подвижной части вибровозбудителя непосредственно по электрическим сигналам на катушке.

Проведенные испытания показывают, что данный метод обладает достаточной точностью и может быть использован в различных частотных испытаниях. Также возможно применение метода для ЭММ флаттера и других перспективных технологий.

Литература

1. Bruel and Kjaer Modal analysis of large structures / Bruel P.V. – Kaerum. 2007.
2. *Вард Хейлен, Стефен Ламменс, Пол Сас*. Модальный анализ: теория и испытания / Левковский Г.В. - ООО ”Новатест”, 2010.
3. *Стрелков С.П.* Введение в теорию колебаний / Государственное издательство Технико-Технической литературы. 1950.
4. *Карклэ П.Г., Малютин В.А., Мамедов О.С., Поповский В.Н., Смотров А.В., Смыслов В.И.* Ученые записки ЦАГИ. О современных методиках наземных испытаний самолетов в аэроупругости / Труды ЦАГИ. 2012. Вып. 2708.

УДК 620.177

Развитие методов определения характеристик упругости композитов на изгиб

Хеин Зин Мое, В.А. Киреев, Йе Тинт Хут

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет)

Рассматривюется стандартные и нестандартные методы определения характеристик упругости (модуль) композитов при исытанях на изгиб.

Важной задачей при внедрении композиционных материалов в авиакосмических конструкциях является разработка методов определения физико-механических характеристик материалов. Испытания на изгиб являются одним из эффеективных способов экспериментального определения модулей упругости и сдвига.

Опыт с прямоугольными образцами (полос на изгиб) является трехточечным согласно стандартам на изгиб по трехточечной и четырехточечной схемам (рис. 1, 2).

Например, секущий модуль упругости крайних волокон E_f^{secand} , МПа, вычисляют по формуле

$$E_f^{\sec and} = \frac{L^3 \times m}{4 \times b \times h^3}, \tag{1}$$

где, E – модуль упругости при изгибе, [МПа], L – диапазон поддержки, [мм], m – наклон секущей кривой графика (нагрузка–деформация), b – ширина, h – высота.

Секущий модуль упругости крайних волокон E_f^{secand} , МПа, по схеме, рис. 2, вычисляют по формуле

$$E_f^{\sec and} = \frac{0,17 \times \mathrm{L}^3 \times \mathrm{m}}{\mathrm{b} \times \mathrm{h}^3}, \tag{2}$$

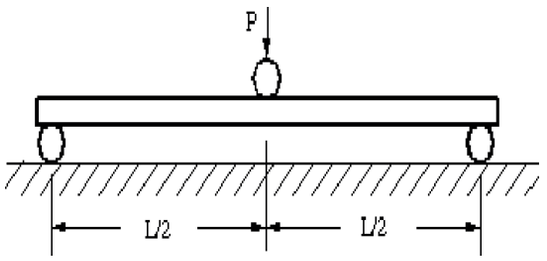
Рассмотрим другой способ определения. Для этого воспользуемся установкой (рис. 3), которая позволяет один образец испытывать по схеме трехточечного изгиба, а другой – по схеме четырехточечного. Установка содержит основание 1, установленные на нем опоры 2, 3 и симметрично расположенные, по отношению ним, промежуточные опоры 4 и 5, предназначенные для размещения на них образцов 6, 7, и элемент 8, необходимый для нагружения обраца 6 поперечной силой в сечении, равноудаленном от опор.

Модули упругости и сдвига определяют по формулам

$$E_x = \frac{Pa^3}{6I}\eta\frac{1+3\eta-\eta^2}{f_2-f_1}, \tag{3}$$

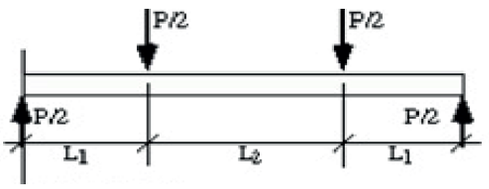
$$G_{xz} = \frac{kPa}{2F}\eta\frac{1+3\eta-\eta^2}{f_1(1+3\eta)-f_2\eta^3}. \tag{4}$$

При определении модуля сдвига можно исключить погрешность, связанную с прогибом образца, вызванным изгибающим моментом.



P – нагрузка; *L* – длина пролета

Рис. 1. Трехточечный изгиб



P – нагрузка; *L* – длина пролета

Рис. 2. Четырехточечный изгиб

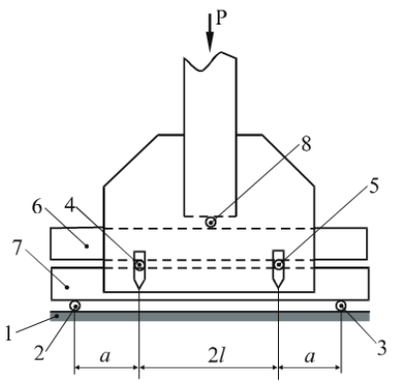


Рис. 3. Установка для испытаний образцов на изгиб

1 – основание; 2, 3 – основание опоры; 4, 5 – промежуточные опоры; 6, 7 – образцы; 8 – элемент для нагружения образца 6, *P* – нагрузка; *L* – длина пролета

Литература

1. *Васильев В.Б., Протасов В.Д., Болотин В.В.* [*и др.*]. Композиционные материалы. Справочник. М.: Машиностроение, 1990.
2. *Киреев В.А., Наумов С.М.* Способ определения модулей упругости и сдвига анизотропных материалов при испытаниях на изгиб// Труды ЦАГИ. 2002. Вып. 2651. С. 199–202.
3. *Тарнопольский Ю.М., Кинцис Т.Я.* Методы статических испытаний армированных пластиков. М.: Химия, 1981.

УДК 620.177

Определение характеристик упругости оболочных конструкции из композитов при испытаниях на изгиб

Йе Тинт Хту, Хеин Зин Мое, В.А Киреев

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Классическая программа определения характеристик упругости на цилиндричских оболочках из ортотропных КМ предусматривает следующие виды нагружения при нормальной, повышенной и пониженной температурах:

а) осевое растяжение при определении E_1^+ и ν_{12}^+;

б) осевое сжатие при определении E_1^- и ν_{12}^-;

в) внутреннее давление при определении E_2^+ и ν_{21}^+;

г) внешнее давление при определении E_2^- и ν_{21}^-;

д) кручение при определении G_{12},

здесь E – модуль упругости при растяжениии, ν – коэффициент Пуассона, G – модуль сдвига, знаки [+] и [–] соответствуют растяжению и сжатию, а индексы 1 и 2 осевому и окружному направлениям. Для выполнения этой программы необходимо пять стендов, реализующих указанные виды нагружения.

Предлагаемая методика определения характеристик упругости материала оболочек при нормальных и повышенных температурах основана на разработанном авторами [1] способе определения этих характеристик при нормальной температуре.

На рис. 1 представлена схема осуществления способа. Оболочку радиусом R и толщинной h консольно защемляют на одном конце, например, в плите 2 испытательного стенда. На свободном конце прикладывают сосредоточенную поперечную силу Q, например, посредством гидравлического силовозбудителя. На поверхности оболочки вне зон торцевых сечений располагают датчик 1 в направлении по образующей цилиндрической оболочки в плоскости приложения силы на расстоянии L от нагруженного торца ($L > 2{,}5\ \sqrt{R/h}$), под углом ±ϕ к образующей. Положительный эффект от такого расположения датчиков заключается в точности раздельного измерения продольных и сдвигающих деформаций, поскольку датчики оказываются расположенными в местах, где действуют максимальные номмальные и косательные напряжения.

Если материал оболочки является равно модульным и ортотропным, то расчет характеристик упругости ведется по фоумулам

$$\mathrm{E}_1 = \frac{Q}{\pi R^2 h \varepsilon_1} L\,; G_{12} = \frac{Q}{\pi R h \gamma},$$

где ε_1 – относительные продольные удлинения, измеряемые датчиком 1, γ – относительные деформации сдвига, измеряемые с помощью датчиков 2 и 3. При $\varphi = \pm 45^{\circ}$ $\gamma = \varepsilon_2 - \varepsilon_3$, а при $\varphi = \pm 60^{\circ}$ $\gamma = 2\,(\,\varepsilon_2 - \varepsilon_3\,) / \sqrt{3}$. Здесь ε_2, ε_3 – относительные деформации продольного удлинения, измеряемые датчиками 2 и 3.

Отметим, что если на поверяхности оболочки в точке, где расположен датчик 1, установить дополнительный датчик 4 в окружном направлении, то можно определить и коэффициент Пуассона ν_{12} материала в растянутой зоне как

$$\nu \frac{+}{12} = \frac{\varepsilon_4}{\varepsilon_1},$$

где ε_4– относительные окружные удлинения, измеряемые датчиком 4.

Если на поверхности оболочки в сжатой зоне установить датчик 5 в продольном и датчик 6 в окружном направлениях, то можно определить модуль упругости и коэффициент Пуассона материала в сжатой зоне по фоумулам

$$\mathrm{E}_1^- = \frac{QL}{\pi R^2 h \varepsilon_5}\ ;\quad \nu_{12}^- = \frac{\varepsilon_6}{\varepsilon_5}.$$

Здесь ε_5, ε_6 – относительные деформации, измеряемые датчиками 5 и 6.

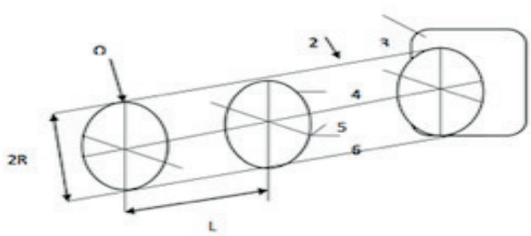


Рис. 1. Схема осуществления предлагаемого способа

Литература

1. *Киреев В.А*. Свойства композиционных материалов, применяемых в конструкциях нагреваемых элементов летательных аппаратов, 2007.
2. *Васильев В.Б., Протасов В.Д., Болотин В.В.* [*и др.*]. Композиционные материалы. Справочник. М.: Машиностроение, 1990.
3. Испытательная техника: Справочник. В 2-х кн. / под ред. Клюева В.В. М.: Машиностроение, 1982. Кн. 1, 1982. 528 с.

УДК 629.73.015.4

Исследование прочностных характеристик элемента замкнутого крыла с нелинейной осью

***Фон Мьинт Тун*[1], *В.Н. Семенов*[1,2]**

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2]Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского

В настоящее время наибольший прогресс среди перспективных летательных аппаратов (ЛА) наблюдается в классе беспилотников (БПЛА). Отсутствие человека на борту снимает многие ограничения по допускаемым перегрузкам, потребным внутренним объемам и системам жизнеобеспечения. Открываются новые возможности по ускоренной разработке и продвижению адаптивных конструкций, подстраивающих свою конфигурацию под режим полета и нагружения ЛА, поскольку не столь остро стоят вопросы безопасности при испытательных полетах.

Одним из наиболее плодотворных направлений в развитии конструкции ЛА является использование замкнутой системы крыльев [1, 2] и оптимизация формы ее пространственной оси. Также перспективно применение интеллектуальных материалов, таких, как сплавы с памятью формы (СПФ) [3, 4], например, сплава NiTi (никелид титана) с приблизительно равными долями. СПФ могут быть использованы также для изменения жесткостных соотношений элементов конструкций и податливости соединительных шарниров.

ЛА имеет много режимов полета и, соответственно, расчетных случаев нагружения. Преобразование конструкции с использованием механизмов и приводов делает их разрезными и добавляет им вес. Предпочтителен вариант, когда конструкция сама меняет свою конфигурацию, либо выполняет самонастройку, оставаясь в состоянии единого неразрезного тела. Такую возможность дает использование СПФ. Например, можно выполнить разворот подконструкций, крыла и фюзеляжа, жестко связанных между собой цельным соединительным элементом – актуатором, который обеспечивает их взаимный разворот за счет своей внутренней деформации при мартенситном преобразовании.

Многообразие уникальных свойств СПФ предопределяет широкие перспективы их использования. Собственно эффект памяти формы, возвращающий при нагревании изделия его первоначальную «запомненную» форму, высокая прочность, мощные силовые реакции, вызываемые нагревом; почти 2–3-кратное изменение модуля упругости для сплава NiTi при мартенситном преобразовании, обратимость эффекта памяти формы, обеспечивающая возможность реализации замкнутых технических циклов, и другие нетрадиционные в использовании свойства сплавов дают основу для построения уникальных конструкций с адаптивными, интеллектуальными и иными новыми свойствами.

Максимальные деформации исполнительных элементов из сплава NiTi не должны превосходить $\varepsilon = 4 \div 8\%$, а максимальные напряжения в них не должны превосходить $\sigma = 400 \div 800$ МПа. Механические и функциональные свойства СПФ позволяют формировать на основе сплава интеллектуальные устройства, реагирующие своим поведением на изменения во внешней среде.

В качестве объектов исследования рассматривается БПЛА с замкнутым крылом и преобразуемой в зависимости от режима полета винтомоторной группой (конвертоплан). На рис. 1 и рис. 2 показан облик такого аппарата в виде спереди и сзади. Обликовая модель

создана с использованием программы Sketch-8. Также формируется расчетная конечно-элементная модель для расчета и оптимизации пространственной формы конструктивно-силовой схемы (КСС) ЛА с использованием программы МКЭ «Русь». На данном этапе поставлена задача по вариации только формы оси заднего крыла, обеспечивающей минимальный вес силовой конструкции этой его части, либо крыла ЛА в целом. На основе итогов ранее проведенных расчетов аналогичных конструкций ожидается снижение веса конструктивного материала исследуемых отсеков крыла на 15–20%.

Экспериментальная часть работы включает формирование лабораторной установки на ФАКТ (ФАЛТ) МФТИ с возможностями исследования замкнутых схем крыла ЛА: включения в КСС адаптивных элементов из СПФ; применение технологий СПЕКЛ-голографии [5].

На рис. 3 показан облик экспериментальной установки, смоделированной в программе Sketch-8 для выбора рациональных значений ее параметров. На рис. 4 показана экспериментальная модель замкнутого крыла, размещенная в вышеупомянутом стенде.

Модель содержит адаптивный элемент *S*-образной формы из СПФ, который при нагреве меняет свою кристаллическую структуру и разгибается с созданием больших усилий, изменяя при этом по-разному локальные углы атаки в различных сечениях системы крыльев. Модель также используется для исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) при традиционном статическом нагружении модели через рычажную систему с замером деформаций стрелочными датчиками. Формируется система анализа местного напряженно-деформированного состояния (НДС) методами СПЕКЛ-голографии.

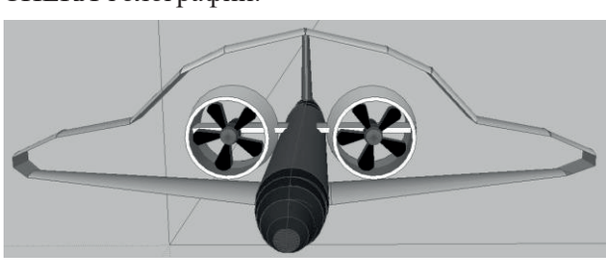


Рис. 1. Вид БПЛА спереди

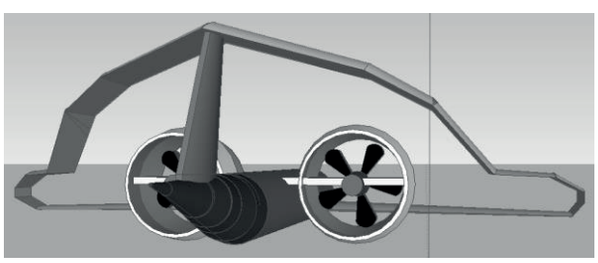


Рис. 2. Вид БПЛА сзади

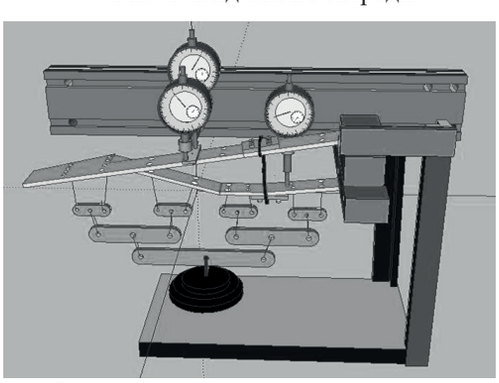


Рис. 3. Электронная визуализация модели стенда

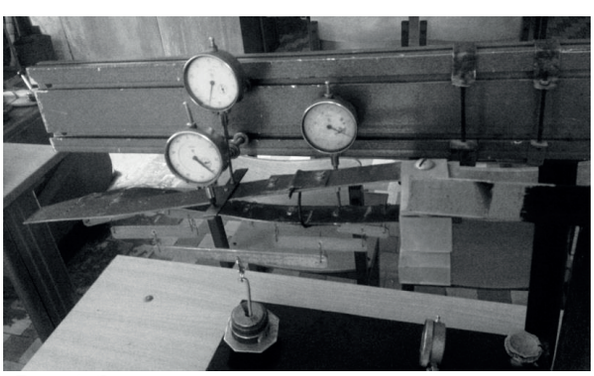


Рис. 4. Экспериментальная установка и модель

Литература

1. *Semenov V.N.* A comparison of the weight ration of the airframe designs of aircraft with a cantilever wing and with a closed wing system // NASA TM-77842. Apr.1985.
2. *Семенов В.Н.* Конструкции самолетов замкнутой и изменяемой схем. М.: ЦАГИ, 2006. 228 с.
3. *Семенов В.Н., Фон Мьинт Тун, Хардип Зинта.* К использованию сплавов с памятью формы в адаптивных и бионических структурах конструкции ЛА // Научно-техническая конференция «Прочность конструкций летательных аппаратов». г. Жуковский: ЦАГИ, 2016.
4. *Семенов В.Н., Фон Мьинт Тун, Хардип Зинта*. К использованию сплавов с памятью формы в адаптивных и бионических структурах конструкции ЛА // Научно-техническая конференция «Прочность конструкций летательных аппаратов». г. Жуковский: ЦАГИ, 2016.
5. *Волков И.В.* СПЕКЛ – голография в экспериментальной механике. Пенза: ПГТА, 2010. 198 с.

УДК 629.7.025.1

Применение методов критериев оптимальности и последовательного квадратичного программирования для решения задачи минимизации веса конструкции

А. Пхио, В.В. Чедрик

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Использованию алгоритмов оптимизации в технике посвящены тысячи статей. В практике проектирования крупномасштабных конструкций для их описания необходимо вводить сотни проектных параметров. Задача оптимизации конструкции включает большое количество нелинейных функциональных ограничений из различных прочностных дисциплин. Решение её осуществляется с использованием либо методов математического программирования (МП), либо при помощи методов критериев оптимальности (КО).

Идея методов КО состоит в том, что необходимо получить рекуррентную зависимость для пересчёта проектных параметров. Такая зависимость получается из условия минимума функции Лагранжа и наряду с проектными параметрами включает неизвестные множители Лагранжа. Основная трудность методов КО состоит, собственно, в определении множителей Лагранжа при наличии многих ограничений. Алгоритмы критериев оптимальности разработаны для многих типов ограничений (ограничения на напряжения, перемещения, критическую силу потери устойчивости и т.д.) [1]. При этом известно немного работ, посвящённых сочетанию различных типов ограничений. В случае ограничений на напряжения и перемещения методы критериев оптимальности обладают высокой скоростью сходимости и служат весьма эффективным средством при проектировании конструкций.

Методы математического программирования являются более общими и основаны на решении уравнений, вытекающих из условий Куна–Такера. В задачах проектирования наиболее широкое применение нашли методы, основанные на вычислении градиентов целевой функции и функций ограничений. Стоит выделить работы, основанные на методах проекции градиента, возможных направлений, последовательного линейного программирования, приведённого градиента, последовательной безусловной минимизации и др. Наиболее предпочтительные алгоритмы оптимизации конструкции в последнее время построены с использованием методов последовательного квадратичного программирования [2]. Большинство из них обладает глобальной сходимостью, позволяет использовать стратегию активного набора ограничений и при этом имеют сверхлинейную сходимость. Скорость сходимости алгоритма имеет большое значение в практических задачах проектирования. Метод, который быстро сходится к решению, близкому к оптимальному, обычно предпочтителен по сравнению с методом, который сходится к точному оптимуму, но медленно. Главным образом, имеют смысл только два критерия оценки программ оптимизации: 1) программа позволяет надёжно получать решение, близкое к оптимуму; 2) количество обращений программы к вычислению функций и их градиентов мало, так как это характеризует пригодность программы к решению конкретных задач проектирования.

В данной работе были проведены численные исследования по оптимизации конструкций с использованием одного из наиболее развитых алгоритмов последовательного квадратичного программирования, разработанного немецким математиком Клаусом Шиттковским [2]. Целью работы являлась разработка программного обеспечения оптимизации конструкций, включающего различные типы функциональных ограничений и проектных параметров. Наряду с задачами по определению оптимальных поперечных размеров силовых элементов приведены задачи оптимизации геометрии конструкции. Показано, что метод последовательного квадратичного программирования может быть эффективно использован в задачах многодисциплинарного проектирования при наличии достаточно большого количества проектных параметров.

Описаны методов критериев оптимальности и последовательного квадратичного программирования для задач оптимизации конструкций. Проведён сравнительный анализ

эффективности и надёжности алгоритмов, основанных на рассматриваемых методах оптимизации. Даны примеры применения методов оптимизации к проектированию силовых конструкций.

Литература

1. *Khot N.S.* Algorithms Based on Optimality Criteria to Design Minimum Weight Structures. Engineering Optimization, V. 5, P. 73–90, 1981.
2. *Schittkowski K.* NLPQL: A Fortran Subroutine Solving Constrained Nonlinear Programming Problems. Annals of Operations Research, V. 5, 1986.

УДК 535.412

Определение физико-механических характеристик материалов при исследовании концентрации напряжений в образце с отверстием

И.В Волков, Ньян Мин Хтет, Вей ХлэйнУ, Тун Мин Лат

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Предложена новая методика определения физико-механических характеристик материалов с использованием спекл-голографической интерферометрии. Метод спекл-голографии позволяет исследовать напряженно – деформированное состояние элементов авиационных конструкций из различных материалов [1, 2]. Это позволяет определять физико-механические характеристики материалов при натурных испытаниях авиаконструкций.

В голографической интерферометрии деформированных объектов чувствительность интерференционных полос существенно отличается по разным компонентам тензора деформаций. Поэтому при ограниченной корреляции оптических полей регистрации деформаций обычно наблюдаются главные компоненты тензора деформаций. Так при растяжении достаточно толстых образцов наблюдаются плоские компоненты на интерферограммах.

В работе проводились измерения модулей упругости на образцах с отверстием из алюминиевого сплава при растяжении на испытательной машине INSTRON E 10000.
На толстом образце из материала Д-16 с размерами: толщина 5 мм, ширина 24 мм, с площадью поперечного сечения F = 120 мм^2, дифференциальная нагрузка составляла ΔP = 100–400 кг; размер спекл-голограмм 50×50 мм^2 регистрировали интерферограммы, отфильтрованные по схеме рис. 1.

$$\mathrm{Sin}\,\alpha = \frac{X}{F},$$
$$U_\lambda = \frac{\lambda}{\mathrm{Sin}\,\alpha},$$
$$\mathcal{E} = \frac{U\lambda}{a},$$
$$E = \frac{\sigma}{\mathcal{E}},$$
$$\sigma = \frac{\Delta P}{S}.$$

Здесь $U\lambda$ – цена полосы на интерферограмме, λ – длина волны, E – модуль упругости, σ – напряжение, $\mathcal{E}$ – деформация, ΔP – дифференциальная нагрузка, S – площадь поперечного сечения.

Следует заметить, что экспериментальные данные могут отличаться от табличных справочных данных, основанных на стандартных измерениях типовых материалов. Использование экспериментальных измерений всегда предпочтительнее, так как они отражают особенности работы материалов в каждом эксперименте. Предложенная методика измерения модуля упругости и деформации обладает простотой и приемлемой для практики информативностью. Она позволяет определять физико-механические характеристики материалов при сложном нагружении и испытании материалов и конструкций.

По нашим измерениям: деформация $\varepsilon = 0.32 \times 10^{-3}$, модуль упругости $E = 7.8125 \times 10^{4}$ МПа.

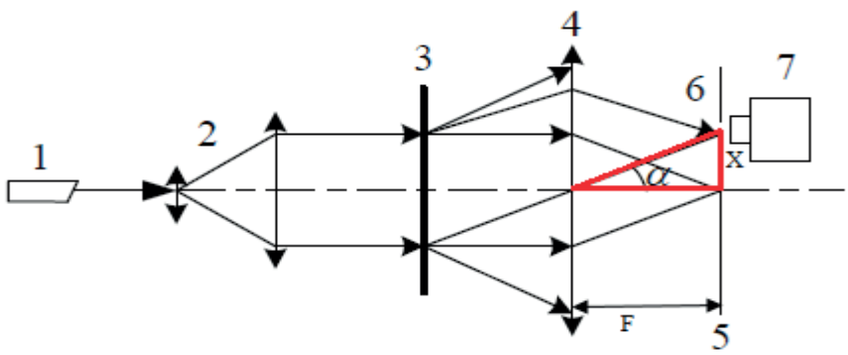


Рис. 1. Оптическая схема фильтрации спекл-голограм: 1 – лазер, 2 – коллиматор, 3 – спекл-голограмма, 4 – линза преобразования Фурье, 5 – частотная плоскость, 6 – диафрагма фильтрации пространственной частоты, 7 – видеорегистратор

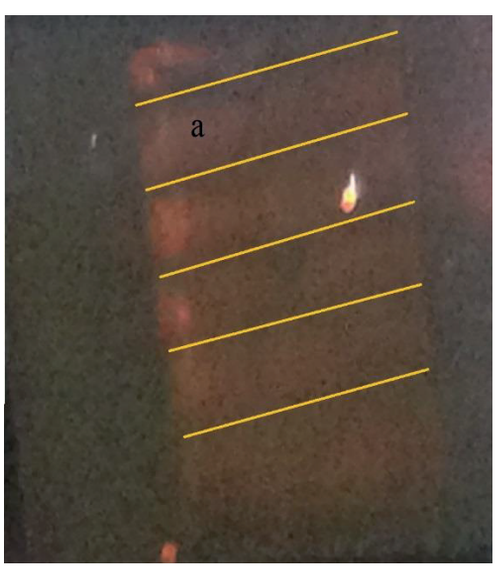


Рис. 2. Спекл–интерферограмма (a – шаг полос)

Литература

1. *Волков И.В.*, *Клименко И.С.* Устройства для интерферометрического измерения деформаций объектов. Авторское свидетельство №934215, опубл. 7.01.1982г., бюл. 21.
2. *Волков И.В.* Использование метода спекл-голографии в экспериментальной механике // Измерительная текника. 2017. № 2. С 42–46.
3. *Волков И.В. Ньян Мин Хтет, Вей ХлэйнУ, Тун Мин* Лат. Использование голографической интерферометрии для регистрации компонент деформации авиационных конструкций // Труды 59-й конференции МФТИ. 2016.

УДК 691.87

Лёгкая арматурная сетка с квадратными ячейками

Е.И. Якимова[1], А.И. Драцкая[2]

[1]Московский государственный строительный университет
[2]МБОУ «Гимназия №5» г. Королёва

Задача об изготовлении новой арматурной сетки с квадратными облегчёнными ячейками появилась после исследования различного типа перекрытий в строительных конструкциях [1]. При проектировании перекрытий надо учитывать не только прочность конструкции, но и минимизировать массу и расход строительных материалов [2, 3]. Такая задача оказалась актуальной не только для строительства, но и особенно для авиационно-космической техники. Особенно важной оказалась задача арматурного обхода деталей. Например, необходимо усилить квадратную или прямоугольную область балками перекрытия в строительстве или силовой арматурой в конструкции космического аппарата, но на пути арматуры находится деталь, которую никак нельзя перенести в другое место: оконный проём, иллюминатор, антенна, датчик и т.д. В этом случае дополнительный силовой элемент прокладывают по обходному пути, увеличивая массу конструкции не только за счёт повышения прочности, например, проката из сортамента, но и за счёт увеличения расхода материала. В этой работе изучается вопрос минимизации массы конструкции при оптимизации арматурного обхода деталей.

Даже самая простая задача о перекрытии квадратной области балками имеет далеко нетривиальное решение в виде двух диагоналей. Но даже при диагональном перекрытии не было изучено утяжеление конструкции при отступах от рациональной схемы схождения балок в центре квадрата. Обобщением задачи арматурного обхода деталей с минимальным утяжелением конструкции является прямоугольная область. Задачи для перекрытия квадратной и прямоугольной областей были решены строго аналитически методами математического анализа. Была записана целевая функция – общая длина балок перекрытия квадратной или прямоугольной области, применено необходимое условие экстремума, проверено достаточное условие минимума и получен, казалось бы, тривиальный результат о рациональности диагонального перекрытия. Однако этот результат был использован в качестве исходных данных для расчёта проигрыша в длине перекрытия при отступе от рациональной схемы диагонального перекрытия. Полученные аналитические результаты были проверены численно с помощью программы MathCAD-14 и представлены в виде графиков. Эти результаты показали, что для квадрата проигрыш в массе при арматурном обходе одинаков при отступе от центра в любом направлении. Но для прямоугольника, например, с удлинением 10:1 дело обстоит иначе: по ширине прямоугольника точку сходимости арматуры можно перемещать как угодно, вплоть до касания длинной стороны, а по длине – очень ограниченно, не более чем на четверть длинной стороны, потому что потом масса арматурного перекрытия будет резко возрастать, значительно утяжеляя конструкцию. В работе было сформулировано практическое правило арматурного обхода детали, расположенной вблизи центра прямоугольника: рациональнее сдвигать точку сходимости балок или арматуры по ширине, чем по длине.

Появилась задача о существовании других схем армирования квадратной области. Является ли диагональное перекрытие самым лёгким. В геометрии известна задача Штейнера о соединении четырёх вершин квадрата самой короткой линией [4]. Эту задачу можно решить методами математического анализа только при условии, что общий вид соединительной линии известен априорно, например, четыре сходящихся отрезка, как в рассмотренных уже случаях. Но почему четыре отрезка? Штейнер доказал, что пять отрезков соединяют четыре вершины квадрата по более короткому пути, чем четыре. Однако вопрос определения общего вида соединительной линии остался открытым. А.И. Драцкая предложила определять вид оптимальной соединительной линии по аналогии с мыльными плёнками, натянутыми на проволочный кубический каркас. Вид мыльных плёнок сбоку совпадает с формой соединительной линии, предложенной Штейнером [4–7].

После определения вида соединительной линии не составляет труда записать целевую функцию, применить необходимое условие экстремума, проверить достаточное условие экстремума и доказать, что в треугольниках отрезки должны быть наклонены к стороне квадрата под углом 30º, или, что тоже самое, как у Штейнера, углы треугольников рядом с перемычкой должны быть равны 120º. Самое главное то, что ячейка квадратная, поэтому может соединяться с другими квадратными ячейками в новую экономичную арматурную сетку. Квадратная ячейка Штейнера на 3,5% легче традиционной элементарной ячейки-крестика, применяемой в строительстве или в конструкции космических аппаратов, например, в тканевых материалах.

Ячейка Штейнера обладает свойством анизотропии прочности вследствие нарушения диагональной симметрии по сравнению с традиционной ячейкой-крестиком. Свойство анизотропии прочности ячейки Штейнера позволяет создавать множество вариантов арматурных сеток с такими ячейками – все они будут на 3,5% легче традиционных арматурных сеток или тканей с распространёнными квадратными ячейками.

Дальнейшее исследование квадратных ячеек Штейнера связано с изучением их инерционных свойств, построением эллипса инерции для единичной ячейки и комбинации различных соединений анизотропных ячеек и расчётом прочности, предлагаемой новой облегчённой армированной конструкции. А.И. Драцкая предложила обобщение задачи Штейнера для соединения восьми вершин куба самой короткой линией с переходом к оптимальному пространственному армированию конструкций [2]. По результатам работы подготовлены заявки на получение патентов на изобретение и полезную модель, а также заявка на участие в конкурсе «УМНИК» (Участник молодёжного научно-инновационного конкурса).

Литература

1. *Марутян А.С., Оробинская В.Н.* Трехгранные фермы покрытий (перекрытий) и оптимизация их высот // Вестник МГСУ: Научно-технический журнал по строительству и архитектуре. Том 12. Вып. 2 (101). DOI: 10.22227/1997-0935.2017.2. М.: ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ». С.172.
2. *Якимова Е.И.* Минимизация силового арматурного перекрытия прямоугольной формы / Строительство — формирование среды жизнедеятельности. Электронный ресурс: сборник трудов XX Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых (26–28 апреля 2017 г., Москва). М-во образования и науки Рос. Федерации, Нац. исследоват. Моск. гос. строит. ун-т. - Электрон. дан. и прогр. (73, 7 Мб). Москва: Изд-во Моск. гос. строит. Ун-та, 2017. Режим доступа: http://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkrdostupa/ Загл. с титул. экрана. - ISBN 978-5-7264-1660-1. С.420–424.
3. *Драцкая А.И., Скворцова А.А., Якимова Е.И.* Оптимизация арматурного перекрытия в строительных конструкциях / Сборник тезисов участников форума «Наука будущего – наука молодых». Нижний Новгород, 12–15 сентября 2017, в двух томах. Том 1. 295 с.: Ил. Секция 4: «Математика и механика». С. 187–189. ISBN 978-5-9907236-7-2; 978-5-9907236-8-9. Электронный ресурс: http://sfy-conf.ru/
4. *Протасов В.Ю.* Максимумы и минимумы в геометрии. Библиотека «Математическое просвещение» М.: Изд-во Московского центра непрерывного математического образования, 2005. 56 с. Электронный ресурс: *https://www.mccme.ru/free-books/mmmf-lectures/book.31.pdf*
5. *Драцкая А.И., Скворцова А.А.* Структуры на основе минимальных поверхностей / *II* Международная школа конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Биомедицина, материалы и технологии XXI века», 20-23 сентября 2016. Казанский (Приволжский) федеральный университет. Казань: Изд. К(П)ФУ, 2016. С.228. Эл. ресурс: http://media.wix.com/ugd/14a693_b2c3ef2616904b0e83da5ff924c337a3.pdf
6. *Драцкая А.И., Скворцова А.А.* Минимальные кубические структуры из стержней и плёнок / X Всероссийский форум студентов, аспирантов и молодых учёных «Наука и инновации в технических университетах». Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, 24–29 октября 2026. Секция «Новые материалы и технологии». С. 47–48. Электронный ресурс*:* http://ysc.spbstu.ru/forum2016/Forum2016.pdf
7. *Драцкая А.И., Скворцова А.А.* Минимальные кубические ячейки из стержней и плёнок для композиционного материала / 59-я Всероссийская научная конференция с международным участием. МФТИ-ФАЛТ, г. Жуковский, Московская область. 21–26 ноября 2016 Секция

«Прочность летательных аппаратов». Доклад 1505. Электронный ресурс: http://conf59.mipt.ru/static/reports_pdf/1505.pdf

УДК 678.8:620.1

Прогнозирование термовлажностной деградации ПКМ

К.А. Колесник

Московский физико-технический институт (государственный университет),
Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского

В настоящее время полимерные композиционные материалы активно внедряются в высоконагруженные авиационные конструкции. Под влиянием увлажнения и повышенной температуры в процессе эксплуатации прочностные характеристики композитов могут снижаться. Для подтверждения надёжности конструкций проводятся дорогостоящие ускоренные климатикопрочностные испытания. В работе рассматриваются расчётно-экспериментальные подходы оценки деградации конструкций из ПКМ. Важность подходов обоснована необходимостью прогнозировать работоспособность конструкций без проведения непосредственно термовлажностных испытаний. В отчётах [1, 2] показано, что прочностные характеристики углепластиков авиационного назначения зависят от уровня влагосодержания и их температуры и не подвержены дополнительной деградации в процессе длительной эксплуатации. Причём рассеивание характеристик также не подвержено значительным изменениям в процессе экспозиции. Поэтому для прогнозирования работоспособности конструкции при эксплуатации будем базироваться на результатах ускоренных испытаниях образцов и элементах конструкции.

Для улучшения весового эффекта от применения композитов важно оценить деградацию их характеристик при реальных эксплуатационных значениях влагосодержания и температуры. Как показали исследования, в случае использования пластин толщиной 20 мм, процессы влагонасыщения не завершаются в течение 30 лет эксплуатации, а уровень влагосодержания в худшем случае экспозиции в жарком влажном климате составляет 58% от максимального для исследуемого материала. С другой стороны, эксплуатационные температуры также могут быть ниже значений, используемых при термовлажностных испытаниях. Численные расчёты показали, что в процессе руления и взлёта максимальная температура отсека с толщинами панелей 8 мм снижается на 16 °С к моменту возможного приложения эксплуатационных нагрузок. В результате реальные значения климатических факторов могут позволить скорректировать соответствующие запасы по прочности, что улучшит весовые характеристики конструкции.

Литература

1. *Dexter H. B., Baker D. J.* Flight service environmental effects on composite materials and structures //Advanced Performance Materials. 1994. V. 1. N. 1. P. 51–85.
2. *Mardoian G. H., Ezzo M. B.* Flight service evaluation of composite helicopter components. 1990.

УДК 691.87

Плёночная модель нового композиционного материала

А.И. Драцкая[1], А.А. Скворцова[2]

[1]МБОУ «Гимназия №5» г. Королёва
[2]Московский авиационный институт

Объектом исследования является элементарная арматурная ячейка кубической формы для перспективного композиционного материала. В работе [1] были исследованы способы уменьшения общей длины рёбер кубического каркаса. Геометрические методы

были дополнены аналогиями с мыльными плёнками, натянутыми на изучаемый кубический каркас [2, 3]. Дальнейшие исследования показали, что поиск рациональной арматурной ячейки связан с задачей Штейнера о соединении заданного множества точек самой короткой линией. В работе [4] подробно решена задача о соединении четырёх вершин квадрата самой короткой линией. Методами математического анализа эта задача решается с помощью теории экстремумов, но только после определения вида соединительной линии. Авторским предложением является нахождение вида соединительной линии на основе аналогии с мыльными плёнками [5]. А.И. Драцкая изучала форму мыльных плёнок, натянутых на кубический каркас, и заметила, что вид сбоку совпадает с минимальной соединительной линией. На основе этой работы было предложено изготовить новую экономичную арматурную сетку для строительных работ, а также был предложен метод оптимального арматурного обхода деталей при строительстве зданий и сооружений [6]. Другой метод решения задачи Штейнера предложен школьницей без применения правил высшей математики измерением длины линий на миллиметровой бумаге. Экспериментально получилось, что длина перемычки должна быть 24 см при стороне квадрата 60 см. Позднее Е.И. Якимова и А.А. Скворцова доказали аналитически, что при такой стороне квадрата точное значение длины перемычки равно 25,4 см [6]. Это означает, что экспериментальный метод, предложенный школьницей, обладает хорошей точностью с ошибкой 5,6% при классе точности измерительной линейки 4. После решения плоской задачи Штейнера было выполнено обобщение на пространственный случай: соединить восемь вершин куба самой короткой линией. Эта задача может найти важное практическое применение при армировании объёмных строительных конструкций. Как и в случае плоскости, решение задачи проводилось двумя методами, теоретическим и экспериментальным. Для определения вида самой короткой соединительной линии опять была применена аналогия с мыльными плёнками. Оказалось, что мыльные плёнки на кубическом каркасе натягиваются по треугольникам или трапециям, сходящимся к маленькому квадрату в середине куба. Такая форма предполагаемого решения была взята за основу для дальнейшего изучения теперь уже двумя независимыми друг от друга методами – экспериментальным и теоретическим. Экспериментальный метод применяла школьница, она сфотографировала мыльные плёнки на кубическом каркасе так, чтобы хорошо был виден маленький квадрат в середине куба. Студентки применяли теоретический метод – необходимое и достаточное условия минимума функции одной переменной. Целевая функция – общая длина линии. После аналитического решения задачи из проволоки была спаяна большая модель соединительной линии, рёбра куба в которой играют исключительно вспомогательную роль обеспечения удобства транспортировки и прочности. Проволочная модель точного аналитического решения тоже была сфотографирована. Получились две фотографии, экспериментального и теоретического результатов. Масштаб фотографий был изменён так, чтобы характерные размеры совпали для последующего сравнения теоретических и экспериментальных данных. Эти фотографии показаны на рис. 1. Сравнительный анализ полученных результатов доказал правильность теоретического подхода к решению задачи Штейнера с предварительным экспериментальным определением общего вида самой короткой соединительной линии. Этим методом была решена плоская задача о соединении вершин квадрата и пространственная задача о соединении восьми вершин куба самой короткой линией. Теория минимальных поверхностей приводит к сложным теоретическим задачам, но зато наглядно отражает простые закономерности экспериментальными методами, например, с помощью изучения форм мыльных плёнок, натянутых на проволочные каркасы.

Модель перспективного композиционного материала с плёночными силовыми ячейками, полученными на основе решения обобщённой задачи Штейнера, была изготовлена из бумаги. Выкройкой половины силовой ячейки служит правильный шестиугольник, размеченный на шесть правильных треугольников. При сворачивании выкройки в правильную четырёхугольную пирамиду надо наложить две треугольные грани на другие две такие же грани для склеивания. Затем склеенную выкройку надо сложить так, чтобы получился один треугольник. После отрезания одной трети выкройки от

вершины треугольника получится усечённая правильная четырёхугольная пирамида. Пустой квадрат верхнего основания по линейным размерам в три раза меньше пустого квадрата нижнего основания. Вторая усечённая пирамида приклеивается к первой пирамиде по периметру маленького пустого квадрата верхнего основания. Получается бумажная копия мыльных плёнок, натянутых на кубический каркас, показанная на рис. 2.

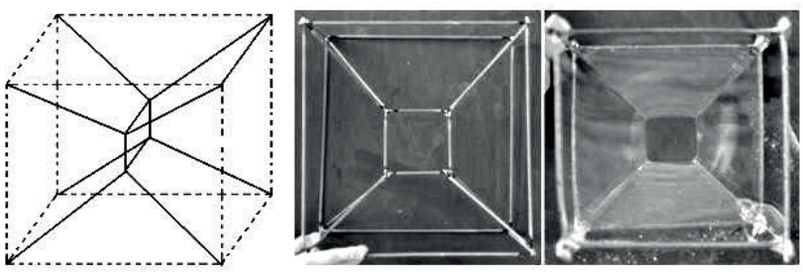


Рис.1. Совпадение теоретического и экспериментального результатов

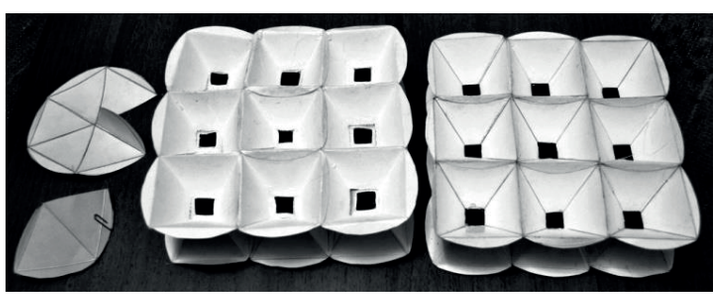


Рис.2. Технологические выкройки и модель склейки ячеек

Литература

1. *Драцкая А.И., Скворцова А.А.* Минимальные кубические структуры из стержней и плёнок / Наука и инновации в технических университетах: материалы X Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых учёных. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. 190 с. С.47–48. Электронный ресурс: http://ysc.spbstu.ru/archive2016/reports.html.
2. Физический энциклопедический словарь / гл. ред. А.М. Прохоров. М.: Советская энциклопедия, 1983. 928 с. Ил. С.551.
3. *Драцкая А.И., Скворцова* А.А. Структуры на основе минимальных поверхностей / II Международная школа конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Биомедицина, материалы и технологии XXI века», 20-23 сентября 2016. Казанский (Приволжский) федеральный университет. Казань: Изд. К(П)ФУ, 2016.
4. *Протасов В.Ю.* Максимумы и минимумы в геометрии. Библиотека «Математическое просвещение» М.: Изд-во Московского центра непрерывного математического образования, 2005. 56 с. Электронный ресурс: https://www.mccme.ru/free-books/mmmf-lectures/book.31.pdf
5. *Драцкая А.И.* Минимальные поверхности 1. Видеоролик, апрель 2016 г. Электронный ресурс: https://youtu.be/4i38ltYQ0cw.
6. *Драцкая А.И., Скворцова А.А., Якимова Е.И.* Оптимизация арматурного перекрытия в строительных конструкциях / Сборник тезисов участников форума «Наука будущего – наука молодых». Нижний Новгород, 12–15 сентября 2017, в двух томах. Том 1. 295 с.: Ил. Секция 4: «Математика и механика». С.187–189. ISBN 978-5-9907236-7-2; 978-5-9907236-8-9. Электронный ресурс: http://sfy-conf.ru/.

УДК 533.6

Исследование характерных особенностей вторичного отрыва при дозвуковом обтекании обратной ступеньки

Т.А. Пименова

Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского

Данная работа представляет собой численное исследование внутренней структуры отрывной зоны на основе двумерных уравнений Навье–Стокса при дозвуковом обтекании обратной ступеньки. В работе рассматривались скорости потока от 20 до 200 м/с, что соответствует диапазону чисел Рейнольдса от 1.2×10^4 до 1.2×10^5, рассчитанных по высоте обратной ступени. Цель работы заключалась в численном обнаружении зоны вторичного отрыва (углового вихря) и исследовании особенностей этой зоны при изменении скорости потока.

Схематическое изображение расчетной области и граничные условия показаны на рис. 1. Поскольку в программном пакете Fluent в ламинарной постановке невозможно численно разрешить вторичный отрыв [1] в силу внутренних программных ограничений, в работе использовалась модель турбулентности Спалларта–Алмараса. Рассматривалась нестационарная задача, вязкость рассчитывалась по формуле Сазерленда. На левой границе ставилось условие набегающего потока. На стенке ставилось условие прилипания, на правой границе ставилось мягкое граничное условие. Правая граница отодвигалась на достаточно большое расстояние, чтобы ошибка в граничных условиях на этой границе не влияла на решение задачи в окрестности зоны отрыва. На верхней границе ставилось условие симметрии, заданное в пакете Fluent. Это условие подразумевает нулевую нормальную скорость в плоскости симметрии и нулевые нормальные градиенты всех переменных в этой плоскости.

Для визуальной демонстрации первичного и вторичного отрыва использовались не линии тока, а траектории частиц, поскольку решалась нестационарная задача. Независимость полученного решения от размеров сетки демонстрировалась путем сравнения решений на одинарной и двойной сетках (рис. 2). Рис. 2 а и в показывают очень хорошую сходимость по сеткам. На рис. 2 б визуально представлены первичные и вторичные отрывные зоны для выбранных параметров. Видно, что при минимальной скорости потока размер вторичного отрыва максимален, и он уменьшается с увеличением скорости. Также было показано увеличение зоны первичного отрыва с ростом скорости. Высота ступеньки в этой работе оставалась постоянной.

В качестве будущего исследования представляет интерес изучение изменения области вторичного отрыва при разных скоростях потока и разных высотах обратной ступеньки.

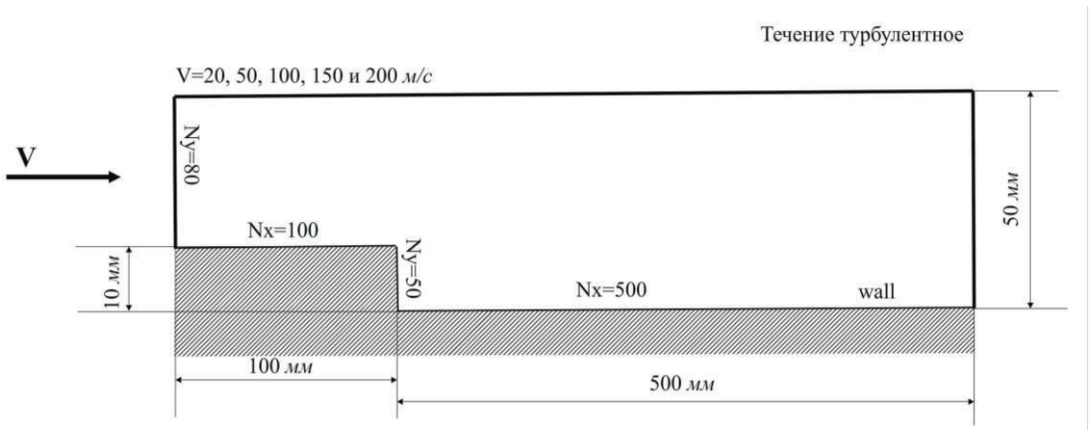


Рис. 1. Схематическое изображение расчетной области, используемые граничные условия и размеры одинарной сетки

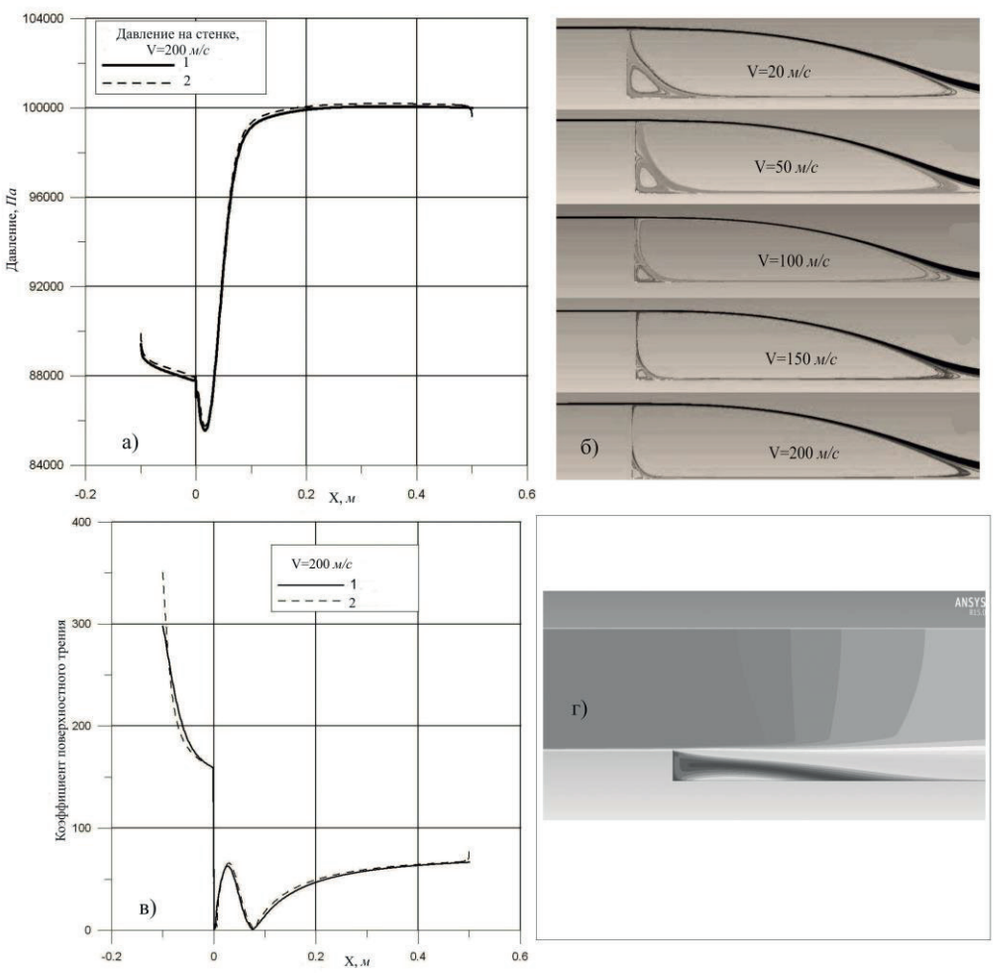


Рис. 2. а) Верификация решения по давлению на стенке: 1 – одинарная сетка, 2 -двойная сетка; б) Изменение размеров вторичного отрыва при увеличении скорости потока от 20 до 200 м/с; в) верификация решения по трению: 1 – одинарная сетка, 2 -двойная сетка; г) поле скорости, полученное в расчете для V = 200 м/с

Литература

1. *Kishan Bellur*. Parametric analysis of laminar flow over a backward facing step//Michigan Technological University, Houghton, MI, USA, 2017, p. 11, опубликовано на сайте: https://www.academia.edu.

УДК 532.533.2

Автомодельные течения вязкого газа, истекающего из вершины конуса

У.Г. Ибрагимов

Московский физико-технический институт (государственный университет)
Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского

Рассмотрено осесимметричное течение вязкого газа от источника, расположенного в вершине конуса. Для решения системы уравнений Навье–Стокса в сферической системе координат для случая нулевой радиальной и аксиальной компонент скорости, введем безразмерные автомодельные переменные вида:

$$u=\frac{u(\theta)}{r^m};\quad \rho=r^{m-2}\rho(\theta);\quad p=\frac{p(\theta)}{r^{m+2}};\quad \mathrm{T}=\frac{\mathrm{T}(\theta)}{r^{2m}};\quad \eta=\left(\frac{\mathrm{T}(\theta)}{r^{2m}}\right)^k;\quad \kappa=\frac{\mathrm{c_p}}{\mathrm{Pr}}\eta, \tag{1}$$

где коэффициенты переноса предполагаются степенными функциями температуры. Полученная безразмерная система уравнений имеет вид:

$$\frac{1}{\sin\theta}\frac{d}{d\theta}\left(\mathrm{T}^k\frac{du}{d\theta}\sin\theta\right)+\frac{4}{3}\left(m^2-1\right)u\mathrm{T}^k+\frac{\mathrm{R}_0}{\left(\gamma\mathrm{M}_0^2\right)^k}\left[\left(m+2\right)p+m\rho u^2\right]=0, \tag{2}$$

$$\frac{\mathrm{R}_0}{\left(\gamma\mathrm{M}_0^2\right)^k}\frac{dp}{d\theta}=\left(1-m\right)\mathrm{T}^k\frac{du}{d\theta}+\frac{2}{3}\left(1+m\right)\frac{d}{d\theta}\left(u\mathrm{T}^k\right), \tag{3}$$

$$\begin{gathered}\frac{\mathrm{R}_0}{\left(\gamma\mathrm{M}_0^2\right)^k}pu\left(2-m\frac{\gamma+1}{\gamma-1}\right)=\\ =\frac{c_p}{\mathrm{Pr}}\left[4m^2\mathrm{T}^{1+k}+\frac{1}{\sin\theta}\frac{d}{d\theta}\left(\mathrm{T}^k\frac{d\mathrm{T}}{d\theta}\sin\theta\right)\right]+\left[\frac{4}{3}\left(m+1\right)^2u^2\mathrm{T}^k+\mathrm{T}^k\left(\frac{du}{d\theta}\right)^2\right]=0,\end{gathered} \tag{4}$$

где θ – угол измеряемый от оси конуса, R_0 – число Рейнольдса, M_0 – число Маха, m и k – параметры автомодельности, на которые введено ограничение $2mk=1$.

Система (2–4) решалась для случая $m=1$ и $k=1/2$ соответствующего модели газа твердых сфер. Получено приближенное аналитическое и численное решение.

По результатам асимптотического решения для случая конуса с малым углом полураствора $\alpha=\varepsilon<<1$, получены приближенные формулы скорости и температуры:

$$u=1-\vartheta^2,\ T=\frac{1}{\gamma M^2}(1-\varepsilon^2\vartheta^2). \tag{5}$$

По результатам численного решения получены оценки критических значений чисел Маха и угла полураствора конуса. Зависимости параметров задачи представлены на рисунках 2–4.

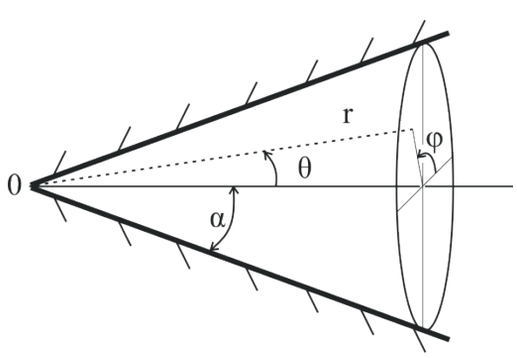


Рис. 1. Схема течения Джеффери–Гамеля в конусе

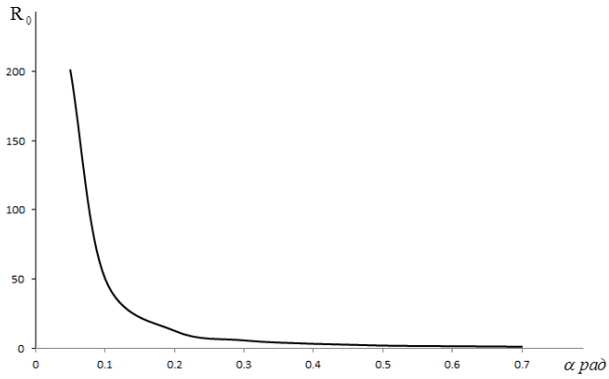


Рис. 2. Зависимость числа Рейнольдса от угла полураствора при M=0,5

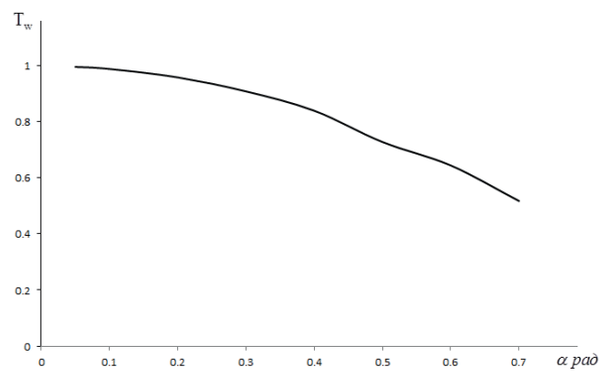


Рис. 3. Зависимость температуры на стенке от угла полураствора при M=0,5

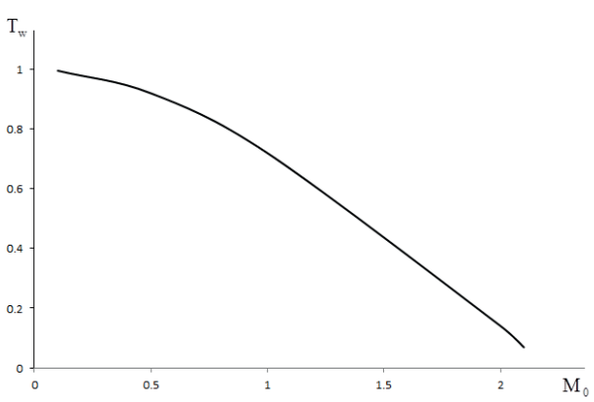


Рис. 4. Зависимость температуры на стенке от M при $\alpha = 0,05$ *рад*

Литература

1. *Berker R.* Intégration des équations du movement d'un fluide visqueux incompressible. Handbuch der Physik. Band VIII/2. 1968. P. 1–384.
2. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 735 с.
3. *Ackerberg R.C.* The viscous incompressible flow inside a cone // J. Fluid. Mech. 1965. V. 21. P. 47–81.
4. *Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П.* Физическая кинетика. М.: Наука, Главная редакция физ-мат. лит-ры. 1979. Т. 10.
5. *Чепмен С., Коулинг Т.* Математическая теория неоднородных газов. М.: Изд-во иностр. лит. 1960.
6. *Себиси Т., Бредшоу П.* Конвективный теплообмен. М.: Мир 1987.

Рис. 4. Зависимость температуры на стенке от M при $\alpha = 0{,}05$ *рад*

Литература

1. *Berker R.* Intégration des équations du movement d'un fluide visqueux incompressible. Handbuch der Physik. Band VIII/2. 1968. P. 1–384.
2. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 735 с.
3. *Ackerberg R.C.* The viscous incompressible flow inside a cone // J. Fluid. Mech. 1965. V. 21. P. 47–81.
4. *Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П.* Физическая кинетика. М.: Наука, Главная редакция физ-мат. лит-ры. 1979. Т. 10.
5. *Чепмен С., Коулинг Т.* Математическая теория неоднородных газов. М.: Изд-во иностр. лит. 1960.
6. *Себиси Т., Бредшоу П.* Конвективный теплообмен. М.: Мир 1987.

УДК 534.6

Разработка и реализация методов beamforming применительно к диагностике некоррелированных диполей

М.А. Демьянов[1,2], М.Ю. Зайцев[1], Г.А. Фараносов[1]

[1]Научно-исследовательский московский комплекс Центрального аэрогидродинамического института им. профессора Н. Е. Жуковского

[2]Московский физико-технический институт (государственный университет)

В последнее время в аэроакустике получили широкое распространение многоканальные системы сбора и анализа данных, позволяющие получать гораздо больше информации о структуре звукового поля и его источниках по сравнению с традиционными одномикрофонными измерениями. Наиболее часто для локализации источников шума в пространстве применяются плоские микрофонные решетки (метод «beamforming») [1–2], позволяющие достаточно надежно определять положения наиболее сильно излучающих участков течения в аэроакустическом эксперименте, и, следовательно, дающие возможность целенаправленно разрабатывать методы снижения уровня значимых источников шума. Однако применение данного метода (в НИО-9 ЦАГИ он реализован в стандартном исполнении Bruel&Kjaer) в некоторых ситуациях может потребовать доработки стандартных алгоритмов под условия конкретного эксперимента (наличие спутного потока и рефракции звуковых волн на слое смешения, движение источников шума, мультипольность источников и др.) с тем, чтобы получать корректные результаты по локализации источников и оценке их амплитуд. Особый интерес представляет диагностика дипольных источников, которые связаны с силовым воздействием обтекаемых поверхностей на среду.

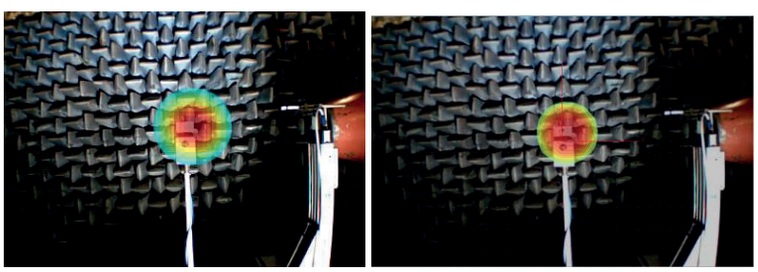
Первым шагом на данном направлении является самостоятельная реализация и тестирование стандартных алгоритмов beamforming. В настоящей работе реализованы алгоритмы, позволяющие определить положения некогерентных монопольных источников звука и их мощность [3].

Верификация проводилась численным моделированием монопольных источников. Валидация метода проводилась на основе обработки результатов реальных измерений собственными версиями стандартных алгоритмов (рис. 1). В качестве инструмента для получения экспериментальных данных, использовалась плоская многоканальная микрофонная решетка Bruel&Kjaer, синхронно регистрирующая звуковые пульсации давления. Проведено исследование качества локализации источников шума в зависимости от геометрии решетки, взаимного расположения источника и решетки, а также частоты излучения.

После валидации стандартного алгоритма был реализован модифицированный алгоритм, в котором в качестве элементарных источников рассматривались некоррелированные дипольные источники с дипольными моментами, параллельными плоскости решетки (рис. 2). Такой алгоритм может быть полезен, если из физических

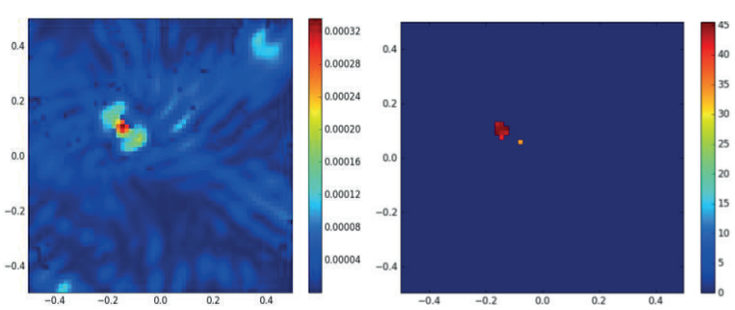
соображений есть основания полагать, что в рассматриваемой задаче доминируют источники дипольного типа (как, например, при изучении шума обтекания элементов планера самолета [4]). Применение стандартного алгоритма в таких случаях может привести к ошибкам в локализации и оценке амплитуды источника.

Таким образом, адаптация алгоритмов локализации под физические особенности источников является необходимой для корректной интерпретации результатов измерений. Кроме того, само наличие вариантов алгоритмов, использующих различные базовые источники, позволит использовать beamforming как научный инструмент исследования механизмов генерации шума: сравнение результатов различных алгоритмов может дать косвенные указания на то, какую в действительности структуру имеет звуковое поле, что, в свою очередь, позволит сделать предположения о физических процессах его возникновения.



а) б)

Рис. 1. Результаты локализации гармонического источника шума в заглушенной камере АК-2: а) собственный алгоритм, б) стандартное программное обеспечение Bruel&Kjaer



а) б)

Рис. 2. Карты локализации дипольного источника с дипольным моментом, параллельным плоскости решетки: а) карта интенсивности; б) карта угла наклона (в градусах) дипольного момента

Работа выполнена при частичной поддержке гранта Правительства РФ по постановлению № 220 “О мерах по привлечению ведущих ученых в российские образовательные учреждения высшего профессионального образования” по договору № 14.Z50.31.0032.

Литература

1. *Podboy G.G., Bridges J.E., Henderson B.S.,* Phased Array Noise Source Localization Measurements of an F404 Nozzle Plume at Both Full and Model Scale // NASA/TM—2010-216366, 2010.
2. *Belyaev I.V., Zaytsev M.Yu., Kopiev V.F*., Effect of Chevrons on the Slat Noise of Straight and Swept Wings // Acoustical Physics, 2015, V. 61, N. 6, P. 715–723.
3. Materials of the “MAAM Course 2016”, May 22-25, 2016.
4. *Kopiev V.F., Zaitsev M.Yu., Ostrikov N.N.,* New noise source mechanism of flow/surface interaction as applied to airframe noise reduction // AIAA Paper 2006-2717, 2006.

УДК 629.5

Механика и гидродинамика привода лодки–амфибии

А.А. Скворцова[1], В.С. Жукова[2]

[1]Московский авиационный институт
[2]МБОУ «Гимназия №5» г. Королёва

Известен шагающий механизм и шагающая машина П.Л. Чебышева, которые были показаны на Всемирной выставке в Париже в 1878 году [1, 2]. Пафнутий Львович Чебышев предложил гребной механизм в качестве движителя для лодки [2, 3]. В работе [4] Скворцовой А.А. и Папиашвили Э.Д. предложена универсальная шагающая платформа для освоения тундры, Арктики и шельфовых областей, способная передвигаться по мелководью. Недостатком всех перечисленных устройств и машин является ограничение окружающей среды, в которой они могут передвигаться. Цель работы заключается в предложении единого, общего для суши и для воды, движителя лодки–амфибии, основная среда для которой является водной.

Для достижения поставленной цели работы было предложено рассмотреть возможность совмещения преимуществ шагающей машины П.Л. Чебышева [1] с гребным механизмом, предложенным этим же автором [3]. Такая идея появилась в результате анализа механизмов, которые П.Л. Чебышев применил в обеих конструкциях. В стопоходящей машине применены четыре лямбдаобразных механизма с диагональной синхронизацией для обеспечения одной степени свободы движения. В гребном механизме применены два лямбдаобразных механизма с общим ведущим кривошипом. Такую же конструкцию предлагали Скворцова А.А. и Папиашвили Э.Д. для исключения двух синхронизирующих шатунов в шагающей платформе, то есть для упрощения конструкции путём сокращения количества рычагов и шарниров [4, 5].

В гребном устройстве П.Л. Чебышева два лямбдаобразных механизма с общим ведущим кривошипом дополнены ещё двумя другими механизмами для обеспечения прямолинейного участка движения механических вёсел, когда те поочерёдно погружаются в воду. Прямолинейное движение вёсел в воде не является очень жёстким требованием, потому что движение верхней точки подвижного шатуна в четырёхзвенном лямбдаобразном механизме П.Л. Чебышева даже по верхней части траектории-дуги не очень сильно искривлено, потому что дуга очень вытянутая. Это означает, что использование верхней дуги траектории для погружённого в воду весла тоже приведёт к отбрасыванию воды назад и передаче импульса лодке вперёд. Если это так, то отпадает необходимость в двух дополнительных спрямляющих движение механизмах, достаточно перевернуть сдвоенную на одном ведущем кривошипе пару лямбдаобразных механизмов П.Л. Чебышева.

Собранный макет такой комбинации механизмов показал возможность лодки не только плавать, но и передвигаться по отмели. Если сдвоенную пару лямбдаобразных механизмов перевернуть, то непосредственно на концы шатунов можно установить вёсла-опоры, которые могут и грести по воде, и шагать по отмели. При таком перевороте механизма теперь уже верхний прямолинейный участок траектории становится пассивным, что необычно для применения в шагающих машинах, да и вообще в технике, где часто требуют и добиваются движения точки по прямой линии. В таком перевёрнутом механизме теперь уже нижний участок дуги на траектории становится рабочим, загребает воду, отбрасывает её назад или ходит по отмели. Если глубина водоёма большая, то вёсла на концах шатунов гребут по воде. На отмели эти же вёсла с опорами шагают по дну водоёма, пока лодка–амфибия не выйдет на «чистую» воду. Несколько искривлённое движение вёсел не критично для лодки хотя бы потому, что в обычном понимании традиционных лодок вёсла тоже движутся по дугам, а не по прямолинейным отрезкам. Для предлагаемого нового движителя лодки–амфибии требуется, чтобы на пассивном прямолинейном участке траектории вёсла опоры полностью поднимались над водой. Это означает, что ватерлиния лодки–амфибии должна находиться немного ниже прямолинейного верхнего пассивного участка движения конца шатуна лямбдаобразного механизма П.Л. Чебышева.

Предлагаемый механизм позволяет жёстко закрепить весло на шатуне. При движении шатуна в воде угол атаки весла изменяется. Для гребли желательно иметь прямой угол атаки, то есть весло должно располагаться перпендикулярно потоку. Так как гребной механизм перевёрнут по сравнению с аналогом, то получить поступательное движение весла в воде не получается. В этом отношении предлагаемый механизм проигрывает гребному механизму П.Л. Чебышева. Закономерен вопрос, сильно ли проигрывает? Для ответа на этот вопрос был изготовлен большой лямбдаобразный механизм с длиной природной траектории шага приблизительно 1 метр. Траектория рабочей точки шатуна была начерчена на миллиметровой бумаге. На дуге, как рабочей части траектории при движении лодки–амфибии по воде, были обозначены углы атаки шатуна, а затем был построен график изменения угла атаки вдоль дуги траектории. Прямолинейный участок траектории исследовать не надо, потому что на нём весло выходит из воды и перемещается вперёд относительно лодки–амфибии по воздуху.

Гидродинамическое обоснование привода сводится к анализу движения весла-щитка в воде. Построенные траектории были изучены более детально на предмет изменения угла атаки шатуна при движении в воде. Оказалось, что лямбдаобразный механизм П.Л. Чебышева обеспечивает прямой угол атаки только в одном положении, приблизительно на одной трети удаления от начала дуги. До этого угол атаки изменяется приблизительно от 88º, а после этого положения – до 132º. Зависимость угла атаки от положения рабочей точки шатуна на дуге траектории практически линейная, колебания обусловлены ошибками измерений. Для максимального выравнивания угла атаки достаточно установить вёсла под углом приблизительно 14º неподвижно относительно шатунов, тогда угол атаки будет изменяться более равномерно в диапазоне от 64º до 116º. Это означает, что поток воды, загребаемый вёслами, снизится не более чем на 10%, да и то в самом конце дуги траектории. Следовательно, нет смысла создавать дополнительные сложные механизмы для стабилизации прямого угла атаки весла, потому что увеличение площади поперечного сечения не превзойдёт 10%, да и то исключительно на конечных участках дуги рабочей траектории. В середине рабочей траектории угол атаки будет отличаться от прямого угла не более чем на 10%, поэтому потери в силе тяги от гребли вёслами будут ещё меньше. Для иллюстрации работоспособности технического предложения был изготовлен макет гребного механизма с одновременным приданием ему функции опор шагающего механизма. Преимуществом предлагаемого способа передвижения лодки–амфибии является простота и надёжность технического решения. Четырёхзвенный механизм П.Л. Чебышева хорошо изучен, содержит всего три рычага, четвёртым является неподвижное звено – корпус лодки–амфибии. Фактически в этом механизме нечему портиться. Нарушения работоспособности возможны, скорее всего, в приводе для вращения ведущего кривошипа, в механизме регулировки скорости вращения вала, в двигателе транспортного средства, в системе управления, но никак не в предлагаемом движителе в виде вёсел–опор.

Вывод. Предлагаемый движитель в виде вёсел-опор для лодки–амфибии с шагающим способом преодоления отмелей основан на новом применении известного четырёхзвенного и гребного механизмов П.Л.Чебышева с максимальным упрощением конструкции для повышения её надёжности. Областью применения предлагаемого транспортного средства с новым движителем являются водоёмы с отмелями.

Литература

1. Шагающая машина П.Л. Чебышева. Электронный ресурс «Математические этюды»: http://www.etudes.ru/ru/etudes/chebyshev-plantigrade-machine/
2. *Артоболевский И.И., Левитский Н.И.* Механизмы П.Л.Чебышёва / Научное наследие П.Л. Чебышёва. Вып. II. Теория механизмов. М. Л.: АН СССР, 1945. С. 52–56. Электронный ресурс: http://www.tcheb.ru/1
3. *Чебышев П.Л.* Гребной механизм. Электронный ресурс: http://www.tcheb.ru/17
4. *Скворцова А.А., Папиашвили Э.Д.* Универсальная передвижная шаговая платформа для освоения тундры и Арктики // Материалы 8-го Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых учёных «Наука и инновации в технических университетах». СПб: Политехн. ун-та, 2014. 170 с.

С. 6-8. ББК 30.1 Н34 С. 6–8.
5. *Скворцова А.А., Папиашвили Э.Д.* Шагающая платформа для освоения тундры, Арктики и шельфовых областей (научный руководитель Лебедев В.В.) // Юные техники и изобретатели / Сборник материалов по итогам II Всероссийской конференции в Государственной Думе РФ / Лучший проект для молодёжи России в 2015 году. Презентации победителей. Номинация "Освоение тундры". С. 32–33. Электронный ресурс: www.юные-техники.рф

УДК 533.527

Исследование Майлсовской неустойчивости в задаче о циркуляционном обтекании цилиндра в ограниченной области.

В.Ф. Копьев[1], С.А. Чернышев[1], М.А. Юдин[1,2]

[1]Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского
[2]Московский физико-технический институт (государственный университет)

Исследование вихревой динамики несжимаемой жидкости имеет важное значение для понимания процессов генерации звука, поскольку звуковое излучение вихревых течений при небольших числах Маха определяется характеристиками течения в приближении несжимаемой жидкости [1]. В этом отношении важную роль играют неустойчивости вихревых течений, так как они могут служить основой для механизмов генерации как вихревых, так и акустических возмущений.

В настоящей работе исследуется один из типов неустойчивости вихревых структур – сдвиговая или Майлсовская неустойчивость, связанная с потоком энергии из критического слоя к колебаниям вихревой структуры [2]. Полное теоретическое и экспериментальное описание сдвиговой неустойчивости в трехмерных вихревых течениях (например, в вихревых кольцах) представляет большую сложность (косвенно на ее наличие указывают характеристики звукового поля вихревого кольца, полученные в акустическом эксперименте, и структура турбулентности вблизи ламинарного вихревого ядра [2, 3]). В связи с этим ранее предпринимались попытки найти сдвиговую неустойчивость в более простых системах. В простейшем вихревом течении с цилиндрическим вихрем (вихрь Ранкина) сдвиговая неустойчивость не возникает (кельвиновские моды ядра нейтрально устойчивы [4]). Тем не менее, существует достаточно простая 2-мерная система, в которой проявляется этот тип неустойчивости. Такой системой является твердый незакрепленный цилиндр, обтекаемый циркуляционным потоком с монотонно убывающей завихренностью [5].

Экспериментальное исследование сдвиговой неустойчивости представляет значительный интерес, поскольку эта неустойчивость может оказаться ответственной за турбулизацию вихревого кольца, а также более сложных 3-мерных вихревых течений [2]. Однако в эксперименте необходимо учесть ограниченность размеров экспериментальной установки и оценить влияние этого фактора на характеристики неустойчивости. Теоретическая задача о колебаниях цилиндра в ограничивающем поток стакане (кожухе) подробно рассматривалась в [6]. Оказалось, что такая система существенно сложнее безграничной системы, даже в случае очень большого радиуса ограничивающего стакана. В задаче появляются новые неустойчивости, а сдвиговая неустойчивость может реализовываться не на одной, а на двух ветвях дисперсионной кривой. В настоящей работе проанализированы варианты экспериментального получения среднего течения, необходимого для появления сдвиговой неустойчивости в системе, и роль вязкости в этой задаче.

Рассматривается исходное обтекание цилиндра радиуса a в ограниченной области (рис. 1), характеризующееся постоянной завихренностью и угловой скоростью $U_0 = \dfrac{\omega_2 R^2 - \omega_1 a^2}{R^2 - a^2} + \dfrac{(\omega_1 - \omega_2) R^2 a^2}{(R^2 - a^2) r^2}$ (течение Куэтта). Его можно получить при вращениях

внутреннего и внешнего цилиндров с частотами ω_1, ω_2 за большое время благодаря вязкости. Такая система оказывается неустойчивой для достаточно тяжелых цилиндров в диапазоне безразмерного параметра [6] $\gamma < \gamma_*, \quad \gamma_* = \dfrac{\left(R^2 - a^2\right)\omega_1\omega_2}{a^2\left(-2a^2\omega_1\omega_2 + R^2\left(\omega_1^2 + \omega_2^2\right)\right)}$. Эта неустойчивость связана с ограниченностью области течения и имеет механизм, отличный от сдвиговой неустойчивости, которая возникает при монотонном профиле завихренности. Дополнительные неустойчивости в задаче являются одной из проблем при попытке экспериментального обнаружения сдвиговой неустойчивости. Неустойчивость в течении Куэтта, связанная с ограниченностью области течения, проявляется при любых конечных радиусах внешнего цилиндра. В случае добавления малой монотонной завихренности течение оказывается неустойчивым в другом диапазоне параметров $\gamma < 1$ на обеих ветвях (рис. 2) дисперсионной кривой. Именно эта неустойчивость может являться предметом экспериментального исследования и для некоторых параметров системы ($\gamma_* < \gamma < 1$) она может быть отделена от неустойчивости, связанной с ограниченностью области.

Малая монотонная завихренность $\Omega_0\left(r,t\right)$ может быть получена в переходном процессе установления течения после изменения угловой скорости одного из цилиндров. Для того, чтобы иметь возможность исследовать неустойчивость во время этого переходного процесса, необходимо, чтобы характерные времена неустойчивости и переходного процесса имели разные временные масштабы. В работе проводится сравнение этих масштабов. Для этого получено решение нестационарной задачи установления течения и оцениваются вязкие силы, действующие на цилиндр. С использованием уравнения, описывающего возмущения в вязкой жидкости (уравнения Орра-Зоммерфельда) проводится оценка влияния вязкости на колебания системы. В результате показано, что в ограниченном течении сдвиговая (Майлсовская) неустойчивость может быть экспериментально обнаружена.

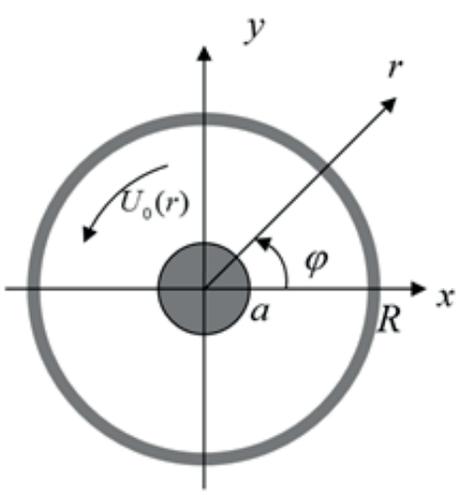


Рис. 1. Рассматриваемая система

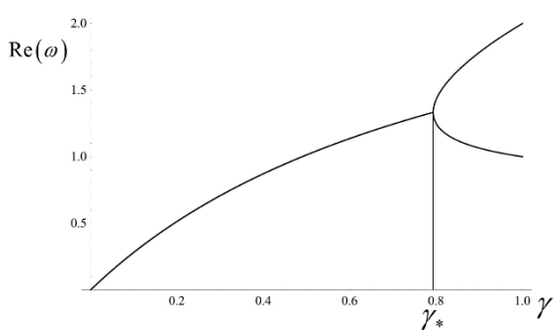


Рис. 2. Действительная часть частот

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект № 17-11-01271.

Литература

1. *Mohring W.J.* On vortex sound at low Mach number // J. Fluid Mech. V. 85. № 4. 1978. P. 685–691.
2. *Копьев В.Ф., Чернышев С.А.* Колебания вихревого кольца, возникновение в нем турбулентности и генерации звука // Успехи физических наук. 2000. Т. 170. № 7. С. 713–741.
3. *Владимиров В.А., Тарасов В.Ф.* Структура турбулентности вблизи ядра кольцевого вихря // Докл. АН СССР. 1979. Т. 245. № 6. С. 1325–1328.

4. *Ламб Г.* Гидродинамика. М.Л.: ОГИЗ Гостехиздат, 1947. 929 с.
5. *Копьев В.Ф., Чернышев С.А.* Неустойчивость колеблющегося цилиндра в циркуляционном потоке идеальной жидкости. // Изв. РАН МЖГ. 2000. № 6. 2. С. 78–92.
6. *Копьев В.Ф., Чернышев С.А., Юдин М.А.* Неустойчивость цилиндра в циркуляционном потоке несжимаемой идеальной жидкости // ПММ. 2017. Т. 81. № 2. С. 216–229.

УДК 533.6.011.7

Двумерное вихревое течение сжимаемого газа, порождаемое вращением бесконечного кругового цилиндра

Д.А. Гаджиев[1,2], А.М. Гайфуллин[1,2], А.В. Зубцов[2]

[1] Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2] Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского.

Хорошо известно решение нестационарной задачи о плоском осесимметричном течении вязкой несжимаемой жидкости, возникающем при мгновенном приведении во вращение бесконечно протяжённого кругового цилиндра. В любой ограниченной области пространства на достаточно больших временах устанавливается потенциальное течение с циркуляцией, равной циркуляции на поверхности цилиндра Γ_*. Таким образом, поле окружной скорости $w=\dfrac{\Gamma_*}{2\pi r_*}$ является точным стационарным решением уравнений Навье–Стокса несжимаемой жидкости и может быть создано указанным способом.

Для решения ряда задач газовой динамики и аэроакустики необходимо иметь решение аналогичной задачи для случая вязкого сжимаемого газа. Такая задача рассмотрена в настоящей работе. Уравнение импульсов сжимаемого газа усложняется зависимостью коэффициента вязкости от температуры. Вследствие этого установившееся течение в общем случае будет вихревым.

Решение удовлетворяет двумерным нестационарным уравнениям Навье–Стокса. В качестве граничных условий на поверхности цилиндра ставятся условие прилипания для скорости и условие равенства температуры газа фиксированной температуре поверхности; на бесконечности ставятся условия отсутствия возмущений параметров потока. Газ считается совершенным с линейной зависимостью коэффициента динамической вязкости от температуры.

Получено асимптотическое решение задачи при стремлении к нулю параметра $\varepsilon=\dfrac{r_*}{\sqrt{\nu_\infty t}}$, где r_* – радиус цилиндра, ν_∞ – кинематический коэффициент вязкости на бесконечности, t – время. В дальней области $r\sim\sqrt{\nu_\infty t}$ уравнения линеаризуются; решение в главном приближении автомодельно. Течение в ближней области $r\sim r_*$ в главном приближении является установившимся.

Результаты сравниваются с численным решением уравнений Навье–Стокса, полученным с помощью программного комплекса ANSYS Fluent.

Показано, что если на поверхности цилиндра задана температура, большая или равная температуре на бесконечности, то в области $r\sim\sqrt{\nu_\infty t}$ циркуляция в сжимаемом газе будет превышать циркуляцию при тех же r и t в несжимаемой жидкости. Этот вывод справедлив при любой возрастающей зависимости коэффициента динамической вязкости от температуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Проект № 16-01-00128).

УДК 534.231.2

Получение полного набора периодических решений в ядре тонкого изохронного вихревого кольца

В.Ф. Копьев[2], С.А. Чернышев[2], Р.В. Акиньшин[1,2], М.А. Юдин[1,2]

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2]Научно-исследовательский московский комплекс Центрального аэрогидродинамического института им. профессора Н. Е. Жуковского

Работа связана с получением собственных колебаний тонкого изохронного вихревого кольца в безграничной невязкой несжимаемой жидкости вблизи точек сгущения собственных частот. Изохронным вихревым кольцом, следуя [1], будем называть такое стационарное течение, для которого период обращения жидких частиц внутри ядра кольца одинаковый. Использование изохронного вихревого кольца в качестве среднего течения позволяет ограничиться только возмущениями дискретного спектра [1, 3]. Параметр тонкости определяется как $\mu = a/R \ll 1$ (рис. 1), где a – радиус сечения ядра вихревого кольца, R – радиус кольца.

Для нахождения собственных колебаний будет применяться подход, основанный на использовании поля смещения [2] как основной переменной, через которую выражаются все остальные функции, включая завихренность. Для исследования малых колебаний вихревого кольца этот подход использовался в работе [1], где были описаны длинноволновые колебания вихревого кольца, наиболее далеко отстоящие от точек сгущения собственных частот. Главное преимущество поля деформации как основной переменной состоит в том, что в области вихря уравнение для поля смещения оказывается дифференциальным [1], в отличие от интегро-дифференциального уравнения Гельмгольца для поля завихренности.

В работах [1, 2] была разработана процедура получения собственных колебаний вихревого кольца. Согласно этой процедуре, сначала ищутся так называемые базисные деформации – полный набор решений, удовлетворяющих уравнениям для поля смещения внутри вихревого ядра с заданной частотой. Каждой из базисных деформаций соответствуют определенные граничные условия, которые в совокупности представляют полную систему функций на границе вихря. Каждой базисной деформации, в свою очередь, соответствует внешнее потенциальное убывающее на бесконечности решение, которое можно получить, применив закон Био–Савара к возмущению завихренности, соответствующему этой базисной деформации. При этом внешнее потенциальное и внутреннее завихренное решения, вообще говоря, не совпадают на границе вихря. Собственные колебания ищутся как сумма полученных решений с неизвестными коэффициентами. Условие непрерывности решения на границе вихревого ядра позволяет получить коэффициенты разложения собственных колебаний по базисным деформациям и собственную частоту, при которой решение существует. Таким образом, определение базисных деформаций является первым шагом в получении собственных колебаний.

Главной целью данной работы является получение полной системы базисных деформаций в более высоком приближении, чем это было сделано в работе [1]. Это позволит в дальнейшем более детально исследовать колебания вихревого кольца и, в частности, получить решения вблизи точек сгущения и проверить высказанное в [1] предположение о новой неустойчивости, связанной с взаимодействием мод с энергией разного знака. Для получения решения используется стационарное кольцо с изохронным профилем завихренности, найденное в [3] в требуемом приближении.

Следуя [1], выбираются такие криволинейные координаты σ, ψ, s, в которых решаемые уравнения имели бы наиболее простой вид. В главном приближении $\sigma = \rho + O(\mu)$, $\psi = \varphi + O(\mu)$ (рис. 1). При этом уравнения для компонент поля смещения ε^i вида $\exp(-i\omega t)$ для внутренней области вихря в выбранных координатах запишутся следующим образом

$$ipL_p\varepsilon_p^s = i\mu\frac{n}{a}\left(\Omega_0^s(\sigma)\sigma\varepsilon_p^\sigma + \sigma^2 L_p\varepsilon_p^\psi\right) + \sum_{q=-\infty}^{\infty} L_{p-q}\left[-ipg_{ss}^{(q)}\varepsilon_{p-q}^s + i\mu\frac{n}{a}\left(g_{\psi\psi}^{(q)}\varepsilon_{p-q}^\psi + g_{\psi\sigma}^{(q)}\varepsilon_{p-q}^\sigma\right)\right] \quad (1)$$

$$-\frac{\partial}{\partial\sigma}L_p\varepsilon_p^s = \quad (2)$$

$$= i\mu\frac{n}{a}\left(\Omega_0^s(\sigma)\sigma\varepsilon_p^\psi - L_p\varepsilon_p^\sigma\right) + \sum_{q=-\infty}^{\infty} L_{p-q}\left[\frac{\partial}{\partial\sigma}\left(g_{ss}^{(q)}\varepsilon_{p-q}^s\right) - i\mu\frac{n}{a}\left(g_{\sigma\sigma}^{(q)}\varepsilon_{p-q}^\sigma + g_{\psi\sigma}^{(q)}\varepsilon_{p-q}^\psi\right)\right]$$

$$\frac{\partial}{\partial\sigma}\left(\sigma^2 L_p\varepsilon_p^\psi\right) - ipL_p\varepsilon_p^\sigma = i\mu\frac{n}{a}\Omega_0^s(\sigma)\sigma\varepsilon_p^s - \sigma\varepsilon_p^\sigma\frac{\partial\Omega_0^s(\sigma)}{\partial\sigma} + \quad (3)$$

$$+\sum_{q=-\infty}^{\infty} L_{p-q}\left[-\frac{\partial}{\partial\sigma}\left(g_{\psi\psi}^{(q)}\varepsilon_{p-q}^\psi + g_{\psi\sigma}^{(q)}\varepsilon_{p-q}^\sigma\right) + ip\left(g_{\sigma\sigma}^{(q)}\varepsilon_{p-q}^\sigma + g_{\psi\sigma}^{(q)}\varepsilon_{p-q}^\psi\right)\right]$$

$$\frac{1}{\sigma}\frac{\partial}{\partial\sigma}\left(\sigma\varepsilon_p^\sigma\right) + ip\varepsilon_p^\psi = -i\mu\frac{n}{a}\varepsilon_p^s \quad (4)$$

$\mathbf{\Omega}^i = \left(0,\ 0,\ \Omega_0\left(1+\mu^2\frac{21\sigma^2}{16a^2}\right)+O\left(\mu^3\right)\right)$, здесь Ω_0 – константа, g_{ij} – метрический тензор, $L_p = i\left(\Omega_0\frac{p}{2}-\omega\right)$, ω – заданная частота, которая ищется в виде $\omega = \Omega_0\left(\frac{l}{2}+\mu^2\omega'\right)$, $\omega' = O(1)$, l, n, p – целые числа. Значение ω', определяющее собственную частоту вблизи точек сгущения, определяется в соответствии с описанной выше процедурой на последнем шаге решения.

В данной работе найдены решения уравнений (1)–(4) в виде асимптотического разложения по малому параметру μ вплоть до членов $O\left(\mu^5\right)$. В главном приближении найденные решения совпадают с собственными колебаниями цилиндрического вихря

$$\varepsilon_l^\sigma = -\mu i\frac{al\omega'}{n\sigma}J_l\left(\frac{n\sigma}{\mu a\omega'}\right),\ \varepsilon_l^\psi = -\frac{1}{\sigma}J_{l+1}\left(\frac{n\sigma}{\mu a\omega'}\right),\ \varepsilon_l^s = J_l\left(\frac{n\sigma}{\mu a\omega'}\right).$$

Найденные нестационарные решения представляют собой полный набор функций, определяющих движение жидкости вида $\exp(-i\omega t)$ внутри тороидальной области, которые на границе вихря имеют вид суммы гармоник с главной гармоникой вида $\exp(il\psi)$. Эти решения будут использованы для нахождения собственных колебаний изохронного вихревого кольца.

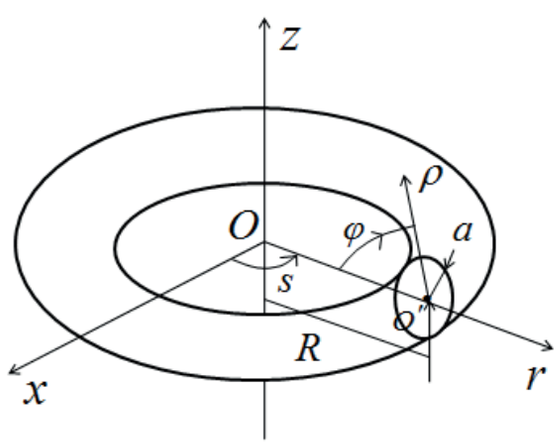


Рис. 8. Вихревое кольцо.

Работа выполнена по гранту РНФ, проект 17-11-01271

Литература

1. *Kopiev V.F., Chernishev S.A*. Vortex ring eigen-oscillations as a source of sound // J. Fluid Mech. 1997. V. 341. P. 19.
2. *Копьев В.Ф., Чернышев С.А*. Колебания вихревого кольца, возникновение в нем турбулентности и генерации звука // УФН. 2000. Т. 170. № 7. С. 713.
3. *Акиньшин. Р.В., Копьев В.Ф., Чернышев С.А., Юдин М.А.* Стационарное вихревое кольцо с изохронным течением в вихревом ядре // МЖГ, 2018 (принято к печати).

УДК 532.526.2

Исследование обтекания пластины на режиме сильного взаимодействия при наличии массообмена

А.А. Балашов[1], Г.Н. Дудин[1,2]

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2]Научно-исследовательский московский комплекс Центрального аэрогидродинамического института им. профессора Н. Е. Жуковского

Исследование вдува газа по нормали к поверхности тела в сверхзвуковой поток показало, что для течений этого типа важную роль играет распространение возмущений вверх по потоку, и при решении необходимо учитывать краевое условие на заднем конце тела [1]. В отсутствии вдува происходит локализация распространения возмущений и реализуется сверхзвуковые течения со «свободным взаимодействием» [2, 3].

При гиперзвуковом внешнем обтекании характер течения в пограничном слое существенно изменяется, так как плотность газа в нем уменьшается, а толщина вытеснения значительно возрастает. Для случая режима сильного взаимодействия было получено автомодельное («трехчетвертное») решение в [4, 5]. В работе [6] с использованием приближенной формулы «касательного клина» впервые было показано, что на режиме сильного взаимодействия задача в окрестности передней кромки имеет однопараметрическое семейство решений, зависящих от некоторого собственного числа. В этом случае возмущения могут распространяться вверх по потоку на всю длину тела. В работе [7], вместо приближенной формулы «касательного клина», невязкая область течения рассмотрена на основе гиперзвуковой теории малых возмущений.

В настоящей работе используется последний подход. Возмущенное течение разбивается на две области: 1) невязкую область между скачком уплотнения и внешней границей пограничного слоя и 2) пограничный слой. В невязкой области используются стационарные уравнениями Эйлера. Для описания параметров потока за косым скачком уплотнения используются соотношения Рэнкина–Гюгонио и краевое условие на внешней границе пограничного слоя. В пристеночной области используется система уравнений пограничного слоя с числом Прандтля равным единице. Уравнение поверхности скачка уплотнения ищется в виде, зависящем от возмущения n-ого порядка по x: $Y_S = Ax^{3/4}\left(1+\alpha_n x^n\right)$, где A и α_n – некоторые константы, которые находятся из граничных условий, n – собственное число.

Полученная система путём преобразования координат и пренебрежения малыми членами приводится к нелинейным дифференциальным уравнениям. Для замыкания системы используется условие сращивания нормальной компоненты скорости на границе двух областей. В работе описываются методы решения систем уравнений для вязкой и невязкой областей течения. Для нахождения давления и температуры в невязкой области используются методы прогонки и Рунге–Кутта 4 порядка точности.

Основные результаты работы изложены в [8]. В данной постановке задачи исследован режим вдува/отсоса газа через поверхность пластины. Исследования проведены для значений показателя адиабаты от 1,1 до 1,6. Получены численные решения для определяющих параметров потока (давление, плотность, температура, скорость). Рассмотрены разложения для n-ых приближений температуры и плотности. Более детально исследован промежуточный переходный слой между вязкой и невязкой областями течения.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (№13-01-00202 и №15-01-03615).

Литература

1. *Матвеева Н.С., Нейланд В.Я.* Сильный вдув на теле конечной длины в сверхзвуковом потоке газа // Ученые записки ЦАГИ. 1970. Т. 1, № 5. С. 13–22.
2. *Нейланд В.Я.* К теории отрыва ламинарного пограничного слоя в сверхзвуковом потоке // Изв. АН СССР. МЖГ. 1969. № 4. С. 53–57.
3. *Stewartson K., Williams P.G.* Self-induced separation // Proc. Roy. Soc. A. 1969. V. 312, N. 1509. P. 181–206.
4. *Lees L.* On the boundary-layer equations and their approximate solutions // JAS. 1953. N. 20. P. 143–145.
5. *Stewartson K.* On the motion of a flat plate at high speed in a viscous compressible fluid. II Steady motion // JAS. 1955. N. 22. P. 303.
6. *Нейланд В.Я.* Распространение возмущений вверх по течению при взаимодействии гиперзвукового потока с пограничным слоем // Изв. АН СССР. МЖГ. 1970. № 4. С. 40–49.
7. *Brown S.N., Stewartson K.* A non-uniqueness of the hypersonic boundary layer // Q J Mechanics Appl Math. 1975. V. 28, I. 1. P. 75–90.
8. *Балашов А.А., Дудин Г.Н.* Обтекание пластины на режиме сильного взаимодействия при наличии массообмена // Труды МФТИ 2015. Т. 7, № 1. С. 16–27.

УДК 534.26

Экспериментальное исследование шума взаимодействия струи и крыла при помощи метода азимутальной декомпозиции

В.Ф. Копьев[2], Г.А. Фараносов[2], И.В. Беляев[2], О.П. Бычков[1,2]

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2] Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского

Для современных самолетов с двигателями высокой и сверхвысокой степени двухконтурности силовые установки в виду ряда причин устанавливаются вблизи крыла, что приводит к появлению нового источника шума [1]. Представляет интерес определить азимутальный модальный состав этого источника и установить основные особенности эффекта расположения двигателя вблизи крыла, что послужит дополнительной информацией при разработке новых теоретических и численных моделей. Для этого потребуется адаптация метода азимутальной декомпозиции (АДТ), который уже зарекомендовало себя при определении мультипольной структуры таких сложных источников шума, как, например, турбулентное вихревое кольцо [2, 3], турбулентная дозвуковая струя [4] и др. Таким образом, работа посвящена развитию метода АДТ в целях его применения при экспериментальных исследованиях шума установленной струи.

Экспериментальные исследования проводились в заглушенной камере АК-2 ЦАГИ, в рамках которых рассматривалась холодная турбулентная струя, истекающая из профилированного маломасштабного одноконтурного сопла, как изолированного, так и сопла вблизи пластины, моделирующей крыло самолета. Экспериментальные данные об амплитудах и направленностях различных азимутальных мод на цилиндрической поверхности, окружающей струю, были получены для случая затопленной струи и струи в спутном потоке с помощью стандартной азимутальной микрофонной решетки, способной перемещаться вдоль оси струи (подробнее см. [3, 5]).

Хорошо известно, что для изолированной струи, в модальном составе которой доминируют несколько первых мод, при применении метода АДТ достаточно использовать измерительную решетку с шестью азимутально равномерно распределенными микрофонами [3, 5]. Однако, в случае установленной конфигурации заранее неизвестно, что модами более высоких порядков можно будет пренебречь. Также, необходимо принять во внимание, что в этом случае вклад в полное поле возмущений в дальней зоне вносят в основном два различных источника, которые сдвинуты друг относительно друга: ось струи представляет собой естественный центр для азимутальной декомпозиции шума струи, в то время как для рассеянного на задней кромке пластины поля таким центром является линия, проходящая через кромку пластины параллельно оси струи. В связи с этим, стандартная решетка микрофонов была модифицирована с тем, чтобы учитывать упомянутые особенности.

Обработка данных для статических и полетных условий продемонстрировала надежность используемой системы сбора информации. Было показано, что выбор линии центрирования для азимутальной решетки играет большую роль при исследовании азимутального состава изолированной и установленной конфигураций. Дальнейший анализ модального состава в дальнем поле выявил сильное изменение в амплитудах и направленности нечетных мод, в то время как четные моды оставались практически неизменными при переходе от изолированной к установленной конфигурации (рис. 1). Данный факт может быть объяснен дипольным характером доминирующего в боковом направлении источника шума, связанного с рассеянием пульсаций ближнего поля струи на задней кромке пластины [6]. Также было показано, что спутный поток, моделирующий условие полета, существенным образом изменяет направленность азимутального состава, что может быть объяснено как рефракцией возмущений на слое смешения спутного потока, так и изменением самих характеристик генерации шума.

Доминирование первой азимутальной моды в шуме установленной конфигурации также означает, что большую часть дополнительной информации о шуме взаимодействия можно получить с помощью всего лишь двух микрофонов. Было показано, что правильное

расположение пары микрофонов действительно позволяет корректным образом выделить первую азимутальную моду установленной конфигурации. Этот факт может быть полезен в случае, когда микрофоны могут размещаться только в ограниченном диапазоне азимутальных углов ввиду геометрических ограничений заглушенной камеры или других причин.

Таким образом, выполнена азимутальная декомпозиция нового источника шума, связанного со взаимодействием струи и крыла. Анализ основных особенностей азимутальных компонент шума впервые позволил выделить шум взаимодействия, не анализируя шум изолированной струи.

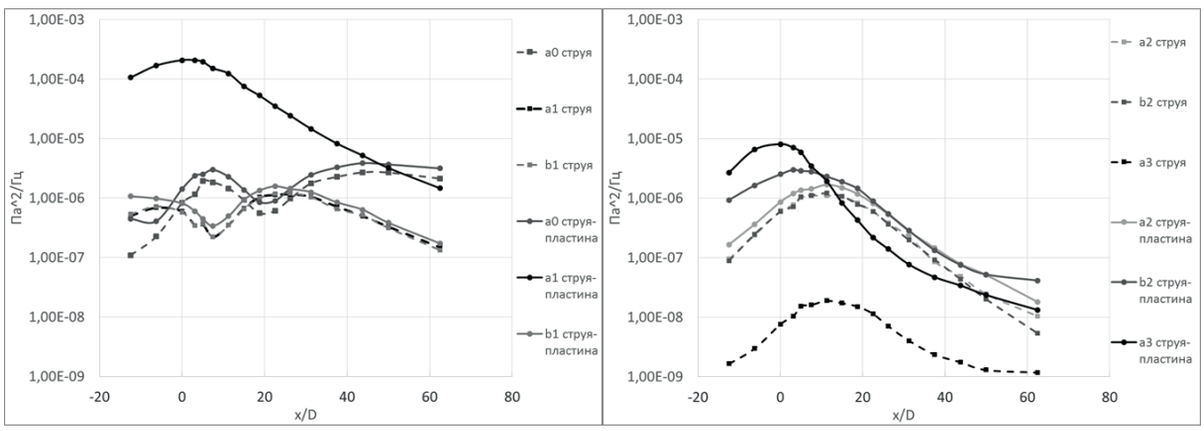


Рис. 1. Направленность азимутальных мод на цилиндрической поверхности для изолированной и установленной конфигурации ($M_j = 0.4, St = 0.1$)

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект 16-01-00746 А).

Литература

1. *Wiart L., Atinault O., Paluch B., Hue D., Grenon R.* Development of NOVA Aircraft Configurations for Large Engine Integration Studies // AIAA paper. 2015. N. 2015–2254.
2. *Kopiev V.F., Zaitsev M.Yu., Chernyshev S.A.* Sound radiation from a free vortex ring and a ring crossing an obstacle // AIAA Paper. 1998. 1998–2371.
3. *Kopiev V.F.* Azimuthal decomposition of turbulent jet noise and its role for diagnostic of noise sources // VKI Lecture Series 2003-04 Advances in Aeroacoustics and Applications. 2003.
4. *Kopiev V.F., Zaitsev M.Yu., Chernyshev S.A., Ostrikov N.N.* Vortex ring input in subsonic jet noise // International Journal of Aeroacoustics. V. 6, N. 4. 2007. P. 375–405.
5. *Faranosov G., Belyaev I., Kopiev V., Zaytsev M., Aleksentsev A., Bersenev Y., Chursin V., Viskova T.* Adaptation of the Azimuthal Decomposition Technique to Jet Noise Measurements in Full-Scale Tests // AIAA Journal. V. 55, N.2. 2017. P. 572–584.
6. *Bychkov O.P., Faranosov G.A., Denisov S.L., Ostrikov N.N.* Theoretical modeling of the excess noise due to jet-wing interaction // Proceedings of the 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Lyon, France. 2016.

УДК 534.231, 519.63

Численное моделирование аэродинамических и акустических характеристик вертолетного винта на режиме горизонтального полета вперед

В.И. Воронцов[1,2], М.Ю. Зайцев[2], С.А. Карабасов[2]

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2]Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского

Данная работа посвящена численному моделированию аэродинамических и акустических характеристик вертолетного винта с учетом набегающего потока. Расчеты проводились для двухлопастной конфигурации для различных углов установки и скоростей

вращения лопастей при постоянной скорости набегающего потока. В основе расчетного метода лежит гибридный метод моделирования шума. Отличительными особенностями используемого метода является разбиение области задачи на две подобласти: ближнюю и дальнюю. В ближней области проводится сквозной расчет уравнений Эйлера в неинерциальной системе координат, в дальней области применяется метод Фокса Вильямса-Хокингса. Были проведены две серии численных расчетов. В первой серии моделировалось движение прямоугольных ненагруженных лопастей в постоянном потоке. Полученные аэродинамические данные сравнивались с данными плоскопараллельного обтекания лопасти. Вторая серия расчетов посвящена моделированию шума, создаваемого вращающейся прямоугольной лопастью, движущейся в равномерном потоке при разных углах установки. Полученные акустические данные сравнивались с данными аналогичного расчета, в котором отсутствует набегающий поток.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по соглашению №14.628.21.0006, уникальный идентификатор проекта RFMEFI62816X0006 (проект ASPIRE).

Литература

1. *Карабасов С.А.* Прямые и гибридные методы в задачах аэроакустики // Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.
2. *A. S. Morgans, S. A. Karabasov, A. P.* Dowling,and T. P. Hynes, Transonic Helicopter Noise // AIAA JOURNAL. July 2005, V. 43, N. 7.

УДК 532.522.2

Динамика струи жидкости, истекающей из неидеального сопла

И.В. Петров, Ф.М. Чупраков

Московский физико-технический институт (государственный институт)

В данной работе рассматривается поведение струи жидкости при истечении через неидеальное сопло. При взаимодействии с неровностями в сопле поток жидкости может изменять направление течения на выходе в окружающее пространство. Это приводит к различным режимам течения жидкости, среди которых одним из наиболее интересных является закручивание струи в спираль, что и стало предметом исследования.

Понимание явления и теоретическая модель были получены из качественного анализа начальных наблюдений. В первую очередь был проведен ряд экспериментов по моделированию потоков жидкости после взаимодействия с неровностями сопла. Самый показательный эксперимент – это взаимодействие двух изолированных несонаправленных потоков жидкости (рис. 1). Из него видно, что разные участки изучаемого потока взаимодействуют друг с другом посредством образующейся между ними жидкостной перемычки. Силы поверхностного натяжения, действующие со стороны перемычки на выделенные субпотоки, играют роль центростремительных и закручивают данные потоки относительно оси симметрии струи. Таким образом, в силу придания струям неколлинеарных скоростей и наличия поверхностного натяжения, образуется спираль (рис. 2).

Приведенная ниже модель описывает приближение к спиральной струе жидкости как вращение двух взаимодействующих цилиндрических потоков, находящихся в свободном падении. Это приближение позволяет получить описание геометрических параметров струи.

В основе описания этой модели лежит рассмотрение выделенного двумя горизонтальными сечениями слоя жидкости, представляющего собой «гантельку» – систему из двух цилиндров, соединенных перемычкой (рис. 3). В горизонтальной плоскости система вращается, поэтому можно записать уравнение движения:

$$F_{пов} = m\omega^2 R \qquad (1)$$

$$F_{пов} = 2\sigma dz\cos\theta \tag{2}$$

где $m = \rho\pi r^2 dz$ – масса элемента жидкости, R – радиус спирали, r – радиус выделенного элемента жидкости, ω – угловая скорость элемента жидкости, σ – поверхностное натяжение жидкости, ρ – плотность жидкости, θ – угол смачивания цилиндра перемычкой. Из чего получаем:

$$\rho\pi\omega^2 R = 2\sigma\cos\theta \tag{3}$$

Запишем уравнение движения по оси z:

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = g - \frac{dP}{\rho dz} \tag{4}$$

где отрицательная $(dP < 0)$ поправка к ускорению поля тяжести возникает из-за изменения давления по высоте. Рассматривая данный элемент жидкости как изолированный цилиндр, подставим давление Лапласа внутри жидкости:

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = g + \frac{\sigma dr}{\rho r^2 dz} \tag{5}$$

Вязкость, как параметр изучаемой жидкости, учтена в рассмотрении моментов сил трения между соседними элементами жидкости (рис. 5):

$$\frac{dL}{dt} = \int dF_{тр} x \tag{6}$$

где x – расстояние от оси вращения до элементарной площадки взаимодействия. Был использован закон вязкого трения Ньютона, градиент скорости по высоте получен из рассмотрения уравнения Бернулли, с учетом неразрывности жидкости и уже упомянутого давления Лапласа:

$$dF_{тр} = \frac{\eta\sigma g}{r\rho\omega v_z^2} dS \tag{7}$$

где v_z – вертикальная скорость цилиндра. В итоге:

$$\frac{2\eta\sigma g}{r\rho^2\omega v_z^3} = \frac{r^2}{2} + R^2 \tag{8}$$

Условие угла смачивания θ – равновесие давлений поверхностного натяжения и разницы между атмосферой и жидкостью в перемычке :

$$2\sigma\cos\alpha d\alpha = (P_0 - P_{ж}(r))dr \tag{9}$$

Конечное условие на угол получено путем изучения уравнения Бернулли общего в зависимости от расстояния до оси вращения. Сделан вывод о том, что в данной задаче нельзя пренебрегать изменением плотности жидкости с радиусом вращения трубки тока. Для выражения давления использовано уравнение состояния жидкости, приведенное в работе Е.Р. Лихачева [1]:

$$V = A + BT - A_1 P - CPT + C_1 P^2 + C_2 PT^2 + V_e \exp\left[-A_2 P - \frac{E + A_3 P}{RT}\right] \tag{10}$$

где V – величина, обратная плотности. В данном уравнении состояния для воды ключевыми слагаемыми оказываются члены с коэффициентами $A, A1, B, C2$. Из него внутренняя энергия жидкости принимает следующий вид:

$$U_{уд} = c_v T - \frac{(V - A - BT)^2 C_2 P_0 T^2}{(-A_1 + C_2 T)^2} - \frac{(V - A)^2 P_0}{-A_1 + C_2 T^2} \tag{11}$$

Внутренняя энергия жидкости входит в зависимость энергии от координаты X и скрывает соответствующие зависимости давления и плотности внутри перемычки

(учтенный эффект достаточно тонкий, поэтому данные параметры для цилиндров мы считаем постоянными на одном уровне Z):

$$\frac{p}{\rho} + U_{уд} + \frac{\omega^2 (R-x)^2}{2} = const \qquad (12)$$

где константа определяется значением энергии в цилиндрах «гантельки». Координата X отсчитывается от центра цилиндра.

Таким образом, из уравнений 3, 5, 8, 11, 12 и уравнения неразрывности получается разрешаемая система относительно всех значимых параметров струи: геометрических (ширина, радиус цилиндрических элементов, форма перемычки) и физических (скорость отдельных элементов по всем трем направления). Эти расчеты можно использовать, например, следующим способом. В подводных аппаратах для нивелирования вращательного момента основного винта используют второй винт, вращающийся в противофазе. Однако с помощью сопла-насадки на винт можно придать потоку жидкости необходимое вращение, которое рассчитывается комбинацией достаточного количества «гантелек», описанных выше. Тем самым избавиться от необходимости двухвинтовой системы, и это лишь одно возможное применение описанной в данной статье модели.

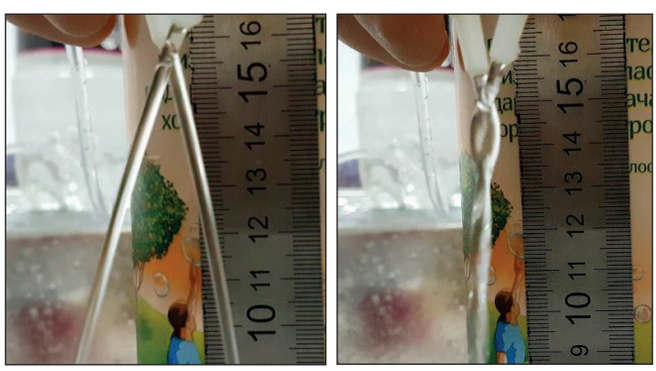


Рис. 9. Две струи до соприкосновения (слева) и после (справа)

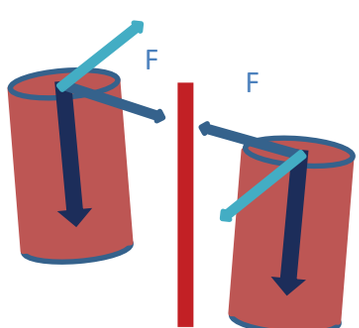


Рис. 2. Схематичное изображение неколлинеарных трубок тока

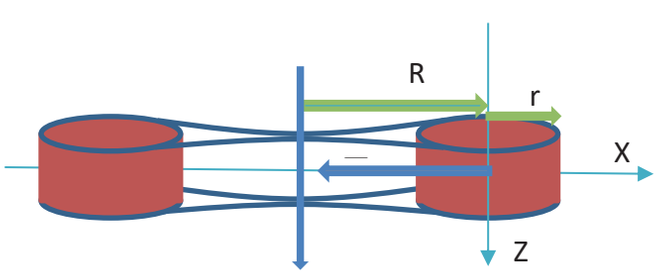


Рис. 3. Главный объект теоретического рассмотрения – "гантелька"– состоит из трех элементов: двух цилиндров и перемычки

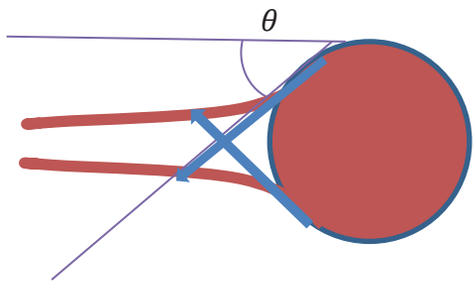


Рис. 4. Вид сверху на элемент вращающейся струи

Литература

1. *Лихачев Е.Р.* Уравнение состояния жидкости. //ВЕСТНИК ВГУ. СЕРИЯ: ФИЗИКА. МАТЕМАТИКА. 2014. № 3.
2. *Сивухин Д.В.* Курс общей физики. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика. М.: Наука, 1980. 399 с.

Секция физики полёта

УДК 629.735.33.015.3:533.695

Применение полезной интерференции в задачах взаимодействия закрученной струи от пропеллера с несущей поверхностью

Ф.Э. Орфинежад[1], Т.М. Притуло[2], Л.Л. Теперин[1,2]

[1] Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2] Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского

Современные жесткие требования, предъявляемые к пассажирской авиационной технике, связанные со снижением расхода топлива, уменьшением шума на местности и в салонах, с повышением безопасности полетов заставляют конструкторов искать неиспользованные резервы при проектировании самолетов. Одним из таких резервов является интерференция между двигательной установкой и планером.

Проектирование летательного аппарата на начальном этапе можно разделить на аэродинамическое проектирование планера при заданных конструктивных ограничениях и выбор параметров двигателя с воздушными винтами. При этом особого внимания заслуживают параметры создающего тягу элемента, т.е. движителя. Сюда включены, в частности, его диаметр, число и форма лопастей пропеллера и количество оборотов. После соединения этих двух деталей характеристики компоновки ЛА (аэродинамическое качество и КПД) могут оказаться равными сумме проектных характеристик, а могут и измениться. Задача проектировщика заключается в том, чтобы взаимодействие планера и двигателя приводило к улучшению характеристик ЛА, другими словами, чтобы интерференция между ними оказалась полезной.

Струя за однорядным пропеллером характеризуется повышенной осевой скоростью по сравнению со скоростью набегающего потока, что обеспечивает тягу, и скоростью закрутки потока, направленной в сторону вращения пропеллера. На крейсерском режиме полета повышенной осевой скоростью можно пренебречь, ввиду ее слабого отличия от набегающей, а вот влияние закрутки потока может оказаться существенным. Идею использовать интерференцию закрученной струи с крылом самолета для конкретной компоновки впервые реализовал американский конструктор Чарльз Циммерман в 30-тых годах прошлого столетия [1]. Он расположил двигатели на концах крыльев, так что ось вращения пропеллеров совпадала с концевой хордой. Вращаясь в разные стороны (правый винт – по часовой стрелке, а левый – против) пропеллеры повышали местные углы атаки на консолях крыла, увеличивая подъемную силу и снижая сопротивление. Существуют также работы, посвященные расчетным методам определения взаимодействия закрученной струи пропеллеров с несущими поверхностями. В работе [2], например, не только дается оценка возможных преимуществ от использования закрученной струи пропеллера, но и определено распределение циркуляции по размаху крыла, которое обеспечит максимальный выигрыш в индуктивном сопротивлении при обдувке его струей однорядного пропеллера. В полной мере эффект полезной интерференции воздушного винта и несущей поверхности можно реализовать только в случае обеспечения определенного положения и направления вращения воздушных винтов. Скорее всего, это будут летательные аппараты с гибридной или полностью электрической силовой установкой. Если воздушные винты на самолете приводятся во вращение электромоторами, то в этом случае, во-первых, легко решается проблема обеспечения нужного направления вращения пропеллеров и, во-вторых, число электромоторов и, соответственно, число пропеллеров может варьироваться в более широких пределах, чем у традиционных компоновок.

В данной работе используются вихревые модели крыла большого удлинения и воздушного винта с заданным распределением циркуляции вдоль лопасти для исследования их взаимного влияния. Решена задача оптимального распределения циркуляции вдоль размаха крыла, обеспечивающая минимум индуктивного сопротивления при обдувке закрученной струей воздушного винта.

Для винтов, расположенных на концах крыла перед передней кромкой, получена численная оценка снижения индуктивного сопротивления, которое в зависимости от поступи и диаметра винтов может приводить к увеличению аэродинамического качества более чем на 20%.

Проведенные экспериментальные исследования качественно подтвердили теоретические предположения о возможности использования закрутки потока за тянущими однорядными винтами для снижения индуктивного сопротивления крыла и соответствующего роста аэродинамического качества.

Проведенный теоретический анализ и экспериментальные измерения показали, что можно получить выигрыш в сопротивлении при переднем расположении пропеллеров и повышение тяги пропеллеров при их заднем расположении относительно крыла, если пропеллеры установлены на концах крыла так, что их оси вращения совпадают с концевыми хордами крыла.

Литература

1. *Ginter S.* Naval Fighters Number Twenty One – Chance Vought V-173 & XF5U-1 Flying Pancakes. Simi Valley, California, 1992. ISBN 0-942612-21-3.
2. *Miranda L.R., Brennan J.E.* Aerodynamic effects of wingtip-mounted propellers and turbines// AIAA Paper 86-1802, 1986. P. 221–228.

УДК 532.526.048.3

Некоторые вопросы оценки безопасности полета летательного аппарата в условиях возмущенной атмосферы

Йе Хтун, А.А Хохлов

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Обеспечение требуемого уровня безопасности полетов (БП) является одним из важнейших условий эффективной деятельности гражданской авиации. Одним из опасных режимов полета является попадание ЛА в возмущенный воздушный поток. В качестве генераторов возмущения воздушного потока могут быть самолет, корабль, горный или городской ландшафт, платформа в море. При входе в возмущенный, турбулентный след на летательный аппарат (ЛА) действуют дополнительные аэродинамические силы и моменты под действием которых ЛА совершает сложное движение и попадает в непростое пространственное положение. Важной задачей для специалистов является выработка критериев, какое воздействие и какие последствия считать допустимыми с точки зрения безопасности полетов, а что не соответствует БП. В части обеспечения БП магистральных самолетов ИКАО такие критерии выработаны и активно используются на практике.

При выполнении посадки в условиях качки корабля кроме воздействия спутного следа следует дополнительно учитывать движение палубы и существенную нестационарность вихревых структур за счет качки.

Целью настоящей работы является разработка подобных критериев для вертолета, выполняющего посадку на палубу авианесущего корабля или морскую платформу. В ходе выполнения работы планируется получение поля скоростей за генератором возмущений в трубном эксперименте, для корабля с учетом его качки, верификация имеющихся математических моделей, внедрение их в программное обеспечение вертолетного пилотажного стенда и выполнение летным составом полетов на доработанном стенде. По результатам работы должна быть предложены критерии БП, методика определения

предельных по БП значений результирующего набегающего потока над палубой корабля и параметров его качки.

По результатам будут выработаны критерии БП, определение предельных значений результирующего набегающего потока над палубой корабля и параметров его качки на данном режиме. В работе выполнен анализ источников возникновения турбулентных вихревых течений, их структура и последствия воздействия на ЛА. Описан подход к назначению предельных по условиям БП параметров движения ЛА.

Литература

1. *В. В. Вышинский, В. К. Иванов, А. В. Терпугов*. Моделирование сложных режимов полёта на пилотажных стендах с учётом атмосферной турбулентности. Аэро- и гидромеханика ТРУДЫ МФТИ. 2015. Том 7, № 1.
2. *В. Ф. Павлеко*. Корабельные самолеты. М.: воениздат, 1990. 320 с.

УДК 533.69.04

Численное исследование интерференции переднего горизонтального оперения с крылом

М.Е. Архипов, А.А. Павленко, М.А. Севостьянов

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Неотъемлемым критерием эффективности боевых летательных аппаратов фронтовой авиации еще со времен Первой Мировой Войны служит их маневренность. Уменьшение радиуса устоявшегося виража приводит к необходимости осуществлять полет на б*о*льших углах атаки с б*о*льшей подъемной силой. Для повышения аэродинамических характеристик крыла на больших углах атаки и увеличения эффективности управления по тангажу используют переднее горизонтальное оперение (далее по тексту ПГО).

В данной работе исследовалась зависимость от угла атаки аэродинамических характеристик изолированного крыла и крыла с ПГО. В качестве исследуемой модели выбрано изолированное трапециевидное крыло со стреловидностью по передней кромке 55 градусов и удлинением 1,5. В качестве параметра, отвечающего за маневренность, решено использовать аэродинамическое качество крыла. Исследования проводились в широком диапазоне углов атаки (от 0 до 40 градусов) при скорости набегающего потока, соответствующей M = 0,15, в условиях высоты 0 м над уровнем моря по стандартной атмосфере.

Для проведения расчетов программным пакетом прямого численного моделирования ANSYS CFX было сгенерировано две блочных структурированных расчетных сетки мощностью 12,5 млн ячеек на изолированном крыле и 15 млн ячеек на крыле с ПГО. Выбранная высота первой ячейки обеспечила Y^+ в пределах от 0,04 до 1,24. Расчет проводился путем решения уравнений Рейнольдса с замыканием моделью турбулентности SST.

Результаты расчета показали, что аэродинамическое качество компоновки «крыло + ПГО» выше чем у изолированного крыла практически во всем диапазоне углов атаки.

Анализ полей течения показал, что на углах атаки от 16 до 17 градусов положение взрыва вихря, сходящего с передней кромки крыла, достигает задней кромки крыла и делает зависимости коэффициентов подъемной силы и момента тангажа нелинейными в области данных углов атаки. Так же обнаружено наличие вторичных и третичных вихрей. Исследована интерференция вихревой пелены, сходящей с ПГО, с вихрем, сходящим с передней кромки крыла.

Построена система геометрических параметров, определяющих взаимное расположения крыла и ПГО, для дальнейшей автоматической оптимизации.

УДК 533.696.7

Применение adjoint solver в задачах внешней аэродинамики

Н.Д. Агеев, А.А. Павленко

Московский физико-технический институт (государственный университет)

В целях минимизации аэродинамического сопротивления носовой части самолета при сверхзвуковых (M = 2) скоростях выполнена оптимизация формы фонаря кабины пилотов. При помощи программного пакета с открытым исходным кодом SU2 [1], разработанного лабораторией аэрокосмического проектирования Стэндфордского университета, проведено решение уравнений Эйлера и Рейнольдса с замыканием по модели турбулентности k-ω SST. Помимо прямого, SU2 включает сопряженный (adjoint) решатель. Идеология сопряженного решателя разработана Энтони Джеймесоном в конце 1980х [2] и позволяет за время, сопоставимое с временем прямого расчета, получить распределение производных некоторой переменной (например, коэффициента сопротивления, подъемной силы, момента тангажа, etc.) по координатам точек расчетной сетки, что, в свою очередь, позволяет преодолеть так называемое «проклятие размерности» при проведении аэродинамической оптимизации формы. Автоматически определяются наиболее важные участки поверхности аппарата. Впоследствии может выполняться модификация формы поверхности данных участков либо назначение соответствующих технологических норм. Пакет SU2 включает в себя инструментарий для параметризации произвольной поверхности методом деформации свободной формы (free-form deformation), а также скрипт для оптимизации с использованием библиотек SciPy и NumPy. Расчетная сетка для уравнений Эйлера – тетраэдральная, включает 2.736 миллиона узлов, для уравнений Рейнольдса – тетраэдральная, с 50 призматическими слоями на поверхности модели, включает 3.459 миллиона узлов. Проведено решение уравнений Эйлера прямым и сопряженным решателем, уравнений Рейнольдса прямым решателем, процедура оптимизация формы проведена в рамках уравнений Эйлера. Решение уравнений Эйлера прямым решателем выполнялось по неявной расчетной схеме 2 порядка методом Roe при числе Куранта 10. Использовался многосеточный метод (multigrid) с 2 уровнями вложенных сеток. Решение проводилось по V-циклу. Решение уравнений Эйлера сопряженным решателем удалось выполнить при числе Куранта 2, также по неявной схеме второго порядка, но без применения многосеточного метода. В качестве критерия сходимости при решении уравнений Эйлера выступало уменьшение среднеквадратичных невязок на 10 порядков по сравнению с десятой итерацией. Прямой решатель произвел для начальной конфигурации 224 итерации, сопряженный – 1839. Решение уравнений Рейнольдса выполнено по методу JST с использованием неявной схемы второго порядка. Число Куранта составляло 3 единицы, использовался многосеточный метод с двумя уровнями вложенных сеток и V-циклом. Для уменьшения невязок на 5 порядков по сравнению с десятой итерацией на начальной конфигурации потребовалось 2492 итерации. Получена улучшающая вариация формы фонаря кабины пилотов.

Литература

1. *Palacios F., Economon T.D., Aranake A.C., Copeland S.R., Lonkar A.K., Lukaczyk T.W., Manosalvas D.E., Naik K.R., Padrón A.S., Tracey B. and Variyar A.* Stanford University Unstructured (SU2): Open-source analysis and design technology for turbulent flows // 2014. AIAA paper, 243, P. 13–17.
2. *Jameson A.* Aerodynamic design via control theory // Journal of scientific computing. 1988. V. 3, P. 233–260.

УДК 533.6.013.127

Способы снижения индуктивных потерь на балансировку компоновки крыло-оперение

Мье Тхеин

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Классическая компоновка пассажирского самолета с крылом большого удлинения, расположенного в близи центра тяжести, и оперением, отнесенным в концевую часть фюзеляжа, является наиболее часто используемой конструкторами авиационной техники. Наряду с неоспоримыми преимуществами этой компоновки, она обладает одним недостатком. А именно, индуктивными потерями на балансировку. Эти потери зависит от запаса статическую устойчивости, от коэффициенты продольного момента крыла при нулевом коэффициенте подъемной силы и других параметров. Балансировка самолета может быть выполнена как при отрицательной так при положительной подъемной силе горизонтального оперения. Не зависимо от знака подъемной силы оперения может появиться дополнительное индуктивное сопротивление. В докладе рассматривается проблема снижения индуктивных потерь на крейсерском режиме полета комбинации крыло–оперение. Для компоновки крыло-оперение, расположенной в одной плоскости создана методика определения дополнительной крутки крыла, которая снизит индуктивные потери при заданном коэффициенте подъемной силы и запасе статической устойчивости. Дополнительная крутка крыла перераспределит циркуляцию крыла и оперения таким образом, что суммарное распределение циркуляции компоновки будет соответствовать распределению циркуляции изолированного крыла. Таким образом индуктивное сопротивление на сбалансированном крейсерском режиме полета будет равно индуктивному сопротивлению изолированного крыла с тем же коэффициентом подъемной силы. То есть индуктивные потери компоновки крыло–оперения будут отсутствовать.

Методика расчета эффективной крутки крыла основана на быстродействующей программе определения аэродинамических характеристик компоновки крыло-оперение, использующей конечно-разностный метод решения полного уравнения для потенциала скорости. Одновременно с определением крутки крыла, обеспечивающей минимальные индуктивные потери, проектируются контуры сечений профилей крыла. Форма профилей крыла выбирается из условия минимума волнового сопротивления. Контуры сечения крыла описываются аналитическими функциями, зависящими от естественных параметров профилей: положение максимальной толщины, радиус затупления носка, кривизна и угол наклона контура на задней кромки и другие параметры. В результате проектирования строится поверхность крыла и определяется угол атаки, при которых компоновка крыло–оперение будет иметь минимальное сопротивление при заданном коэффициенте подъемной силы, числа Маха и запасе продольной статической устойчивости.

УДК 629.735.45.01.035.62

Влияние индивидуального управления лопастями несущего винта вертолета на виброперегрузки

Б.С. Крицкий[1,2], Р.М. Миргазов[1], Лэ Ван Чунг[2]

[1]Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского
[2]Московский физико-технический институт (государственный университет)

Работа посвящена анализу результатов расчетного исследования виброперегрузки несущего винта (НВ), вызванной пульсацией силы тяги НВ вертолета.

Излагаются методика расчета, объект исследования и результаты численного исследования индивидуального управления каждой лопастью по азимуту путем циклического изменения угла их установки с целью уменьшения амплитуды вибраций,

передаваемых на втулку винта [1]. Выработан закон индивидуального управления лопастями по лопастным частотам для пятилопастного несущего винта, позволяющий уменьшить вибрации силы тяги с учетом и без учета махового движения лопастей. Определена область, где виброперегрузки будут минимальные.

Для моделирования процесса обтекания лопастей использовалась вихревая теория винта на базе тонкой несущей поверхности в нестационарной постановке [2]. В соответствии с этим подходом геометрия винта и кинематические параметры его движения считаются известными. Ограничений на форму лопастей винта, а также на характер их движения не накладывается. Лопасти винта заменяются бесконечно тонкими базовыми поверхностями. Для определения нагрузок на несущих поверхностях используется интеграл Коши-Лагранжа. При численной реализации метода расчета непрерывные процессы и распределения заменяются дискретными по времени и пространству. Лопасти винта разбиваются на некоторое число панелей по радиусу и по хорде. В центре панелей размещаются контрольные точки, в которых выполняется условие непротекания, и вычисляются аэродинамические нагрузки. В качестве безразмерного времени принимается угол азимутального положения лопасти.

Неравномерные нагрузки, вызванные силой тяги, разложены по лопастной гармонике и обертонам. Выделены наибольшие величины отклонения от средней амплитуды силы тяги. Выполнен анализ переменных нагрузок с традиционной системой управления. Выработаны алгоритмы управления высшими гармониками, которые реализуются при управлении лопастями и позволяют уменьшить пульсации силы тяги при фиксированном среднем значении силы тяги.

Расчетные исследования показали, что индивидуальное управление высокими гармониками лопасти снижает уровень переменных нагрузок, передающихся на втулку НВ как для “жесткого” винта, так и НВ с шарнирным креплением лопастей.

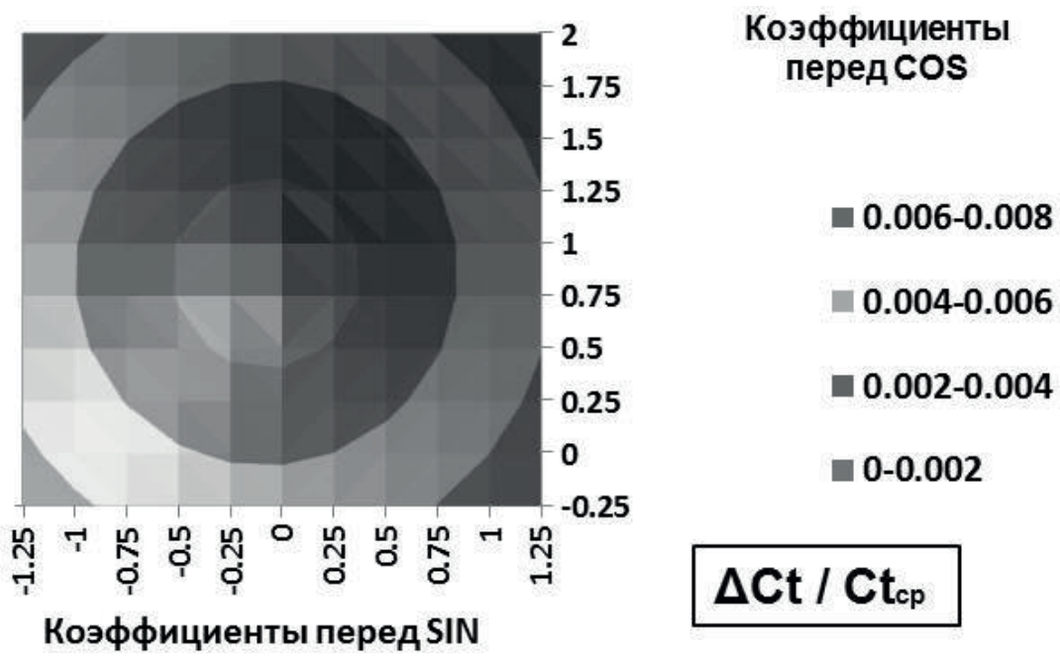
В качестве примера рассматривался пятилопастный НВ. В общем случае индивидуальное управление лопастями задавалось следующим образом:

$$\varphi_{k0} = \varphi_0 - NC5*A_k\cos(5\psi) - NS5*A_k\sin(5\psi),$$

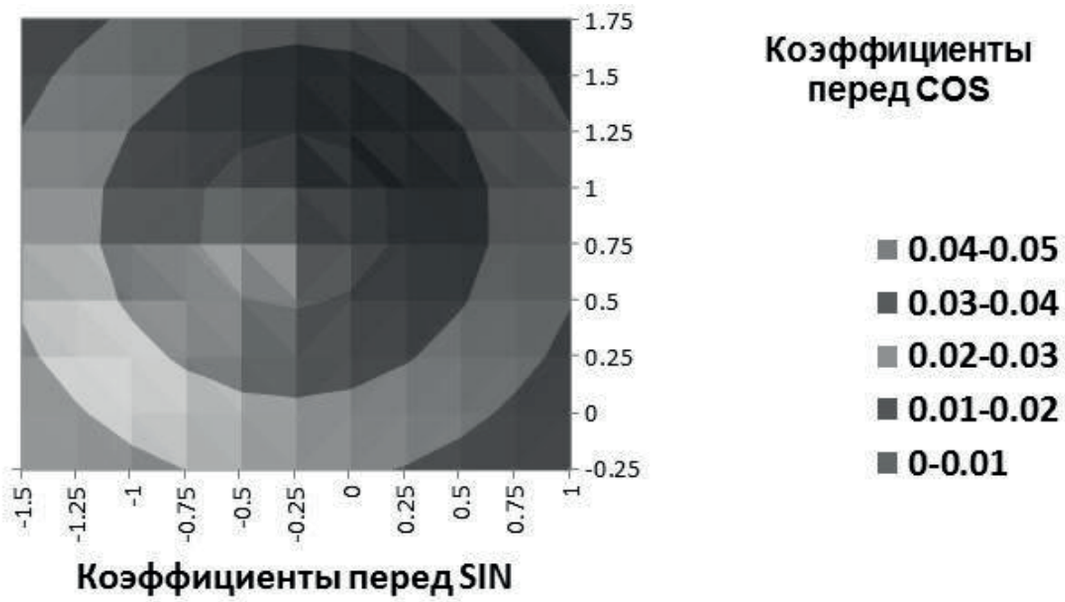
где φ_0=7.5 град, A_k – коэффициент перед sin и cos, $NC5$ и $NS5$ – коэффициенты усиления, варьировались в широком диапазоне чисел ($NC5$ = –1.3…2.5, $NS5$ = –1.3…1.5).

На рисунке 1 показаны величины амплитуд лопастной гармоники коэффициента силы тяги, в зависимости от коэффициентов усиления при горизонтальном полете.

Из рисунка видно, что амплитуда лопастной гармоники и, соответственно, амплитуда виброперегрузки имеет минимум.



а) без махового движения лопастей



б) с маховым движением лопастей

Рис.1. Амплитуды лопастной гармоники коэффициента силы тяги, в зависимости от коэффициентов усиления при управлении по лопастной гармонике

Литература

1. *Крицкий Б.С., Миргазов Р.М., Лэ Ван Чунг.* Исследование влияния индивидуального управления по высоким гармоникам на виброперегрузки, вызванные силой тяги несущего винта вертолета. Научный вестник МГТУ ГА. Том 19, №06, 2016, С. 68–76.
2. *Крицкий Б.С.* Математическая модель аэродинамики винтокрылого летательного аппарата. Труды ЦАГИ. 2002. № 2655, С. 50–56.

УДК 533.69.04

Численное исследование влияния «зуба» на эффективность горизонтального оперения

М.Е. Архипов, А.А. Павленко, К.Д. Стремоусов

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Военные конфликты последних десятилетий показали высокую эффективность применения палубной авиации. Одно из ключевых требований, предъявляемых к летательным аппаратам (далее по тексту ЛА) палубной авиации, является длина пробега при посадке. Для реализации короткого пробега самолет должен заходить на посадку на большом угле атаки, что позволяет ему создавать бо́льшую подъемную силу при меньшей скорости полета. Однако, в завершающей стадии посадки пилоту нужно резко выровнять летательный аппарат для касания передней стойкой шасси ВПП (данный тип посадки самолета называется «вороньей посадкой»), для этого горизонтальное оперение (далее по тексту ГО) ЛА должно обладать высокой эффективностью при заданных скоростях полета ($M \leq 0{,}2$).

Повысить эффективность ГО можно использованием излома по передней кромке, стреловидность передней кромки остается постоянной, а на некотором расстоянии от корневого сечения ГО местная хорда резко увеличивается на величину до 10%, при этом площадь оперения остается постоянной для обеспечения исходной эффективности на сверхзвуковых режимах полета (рис. 1). Подобный тип ГО применяется на большинстве летательных аппаратах корабельного базирования различных стран.

В данной работе получена зависимость аэродинамических характеристик изолированного крыла без излома по передней кромке и с ним на большом диапазоне углов атаки (от 0 до 40 градусов) при скорости набегающего потока соответствующей $M = 0{,}2$, в условиях высоты 0 м над уровнем моря по стандартной атмосфере. Модель крыла геометрически подобна горизонтальному оперению самолетов МиГ-29 и МиГ-29К (стреловидность, размеры корневой и концевой хорды, размер излома) с использованием симметричного профиля толщиной 5%.

Для проведения расчетов программным пакетом прямого численного моделирования ANSYS CFX было сгенерировано две блочных структурированных расчетных сетки мощностью 10 млн ячеек на изолированном крыле и 15 млн ячеек на крыле с изломом. Выбранная высота первой ячейки обеспечила Y^+ в пределах от 0,02 до 0,78. Расчет проводился путем решения уравнений Рейнольдса с замыканием моделью турбулентности SST.

Результаты численного моделирования показали рост эффективности руля высоты при наличии излома по передней кромке, особенно в области больших углов атаки.

Анализ полей течения показал наличие двух вихрей, сходящих с излома. Вихри разнонаправлены (имеют интенсивность разных знаков) и затягивают отрыв с передней кромки до больших углов атаки.

По результатам исследования выбрана параметризация геометрии руля для автоматического поиска оптимальной формы ГО.

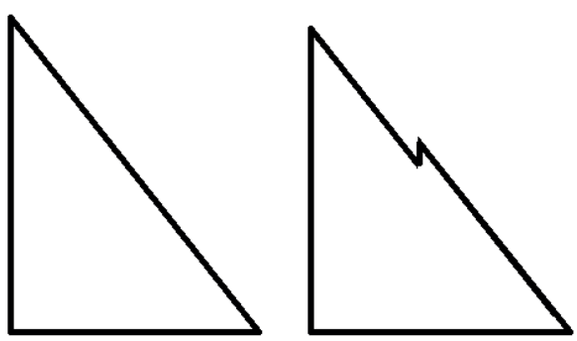


Рис. 1. Схематическое сравнение ГО с изломом и без него

УДК 533.69.04

Выбор параметров для формирования облика сверхзвукового пространственного воздухозаборника на основе диффузора Буземана

М.А. Меняйлов

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Одним из интенсивно исследуемых в настоящее время способов проектирования сверхзвуковых воздухозаборников является использование поверхностей тока известных течений, в частности, конического течения, формируемого при обтекании осесимметричного диффузора Буземана [1]. Принцип построения таких воздухозаборников представлен в работе [2].

Класс сверхзвуковых конических течений, кроме диффузора Буземана, включает поток вокруг бесконечного кругового конуса, обтекаемого параллельно его оси, решение для которого нашли Буземан [3] и Тейлор и Маккол [4], течение А.А. Никольского вблизи специально спрофилированной кормовой части [5], и течения Г.Л. Гродзовского, начинающиеся со скачков в ограниченных кольцевых областях [6], которые также описывались Молдером [7].

Течение в диффузоре Буземана характеризуется тем, что оно начинается с равномерного плоскопараллельного потока и с угла μ_0, соответствующего числу Маха M_1 этого потока, происходит его изоэнтропическое сжатие, после которого формируется замыкающий конический скачок уплотнения, который может быть как сильным, так и слабым. После замыкающего скачка уплотнения поток становится параллельным набегающему (см. рис. 1).

Конические течения описываются, согласно Буземану [1, 3], уравнением в плоскости годографа, где u – скорость вдоль оси, v – скорость в перпендикулярном ей направлении, являющаяся в данном уравнении функцией от u, а V_{max} – максимальная скорость в газе. :

$$vv'' = 1 + (v')^2 + \frac{(u + vv')^2}{a^2},$$

$$a^2 = \frac{\gamma - 1}{2}(V_{max}^2 - u^2 - v^2), \qquad \frac{y}{x} = tg\theta = -\frac{1}{v'}.$$

Другим возможным способом описания конических течений является уравнение Тейлора – Маккола [4], записанное в сферических координатах, где u_r – это скорость в проекции на радиус-вектор, проведенный из центра коничности, являющийся характеристикой данного решения, u_θ – проекция на перпендикулярное ему направление вдоль роста угла θ

$$\left(\frac{du_r}{d\theta}\right)^2 \left[u_r + \frac{du_\theta}{d\theta}\right] = \frac{\gamma - 1}{2}\left(1 - u_r^2 - u_\theta^2\right)\left[2u_r + u_\theta ctg\theta + \frac{du_\theta}{d\theta}\right],$$

$$u_\theta = \frac{du_r}{d\theta}, \qquad r = \frac{u_\theta}{u_r}\frac{dr}{d\theta}.$$

Для численного решения приведенных выше уравнений автором была написана программа при помощи пакета Mathematica. В качестве начальных условий задачи выбирались значение числа Маха M_3 за замыкающим коническим скачком уплотнения и угол δ поворота потока в нём, после чего из соотношений для скачка уплотнения определялись значения числа Маха M_2 перед ним и начального угол наклона θ_s характеристики к оси симметрии. Если начинать решение от входного потока, где начальным углом наклона характеристики будет угол Маха, то в уравнении будет присутствовать мягкая особенность типа «0/0», для разрешения которой надо рассмотреть уравнение вблизи этой точки, где в качестве еще одного начального условия возникнет константа при члене разложения v^2, что показано в работе [8], не имеющая четкого физического смысла.

Для дальнейших приложений была выбрана версия с решением уравнения Тейлора – Маккола, так как уравнение линии тока из его решения в сферических координатах получается без совершения дополнительных преобразований [2].

Для получения облика воздухозаборника из кривой, являющейся пересечением канала заданного сечения и замыкающего конического скачка, надо построить поверхности тока и заменить их твёрдыми стенками воздухозаборника – применить так называемый «метод отвердения» [2].

Воздухозаборник, формируемый на основе изоэнтропического течения сжатия, конструктивно получается слишком длинным по отношению к своему диаметру, поэтому имеет смысл рассматривать укороченный диффузор Буземана, где используются линии тока, обрезанные спереди по линии с фиксированным углом наклона к оси симметрии [1]. Как показано в [9, 10], с учетом вязкости такое построение улучшает характеристики воздухозаборника, хотя течение между двумя скачками уплотнения при этом становится несколько отличающимся от исходного конического [8].

Исходя из условий запуска сверхзвуковых воздухозаборных устройств [11], нельзя допускать слишком большого превышения начальной площади внутреннего канала (в месте его замыкания) к минимальной площади канала – так называемой площади «горла». Для достижения приемлемого соотношения указанных выше площадей замыкающая часть диффузора Буземана может быть трансформирована – после достижения заданной

площади поперечного сечения канала дальнейшее сужение может быть прекращено. Подобный подход применён, например, в работе [12].

Пример сформированного описанным выше образом пространственного воздухозаборника для числа Маха набегающего потока $M_1 = 5.1$ и числа Маха на выходе $M_{out} = 3$ с поперечным сечением, близким к прямоугольному (со скруглёнными углами), представлен на рис. 2.

Автор выражает благодарность за ценные консультации А.Н. Крайко и Н.И. Тилляевой.

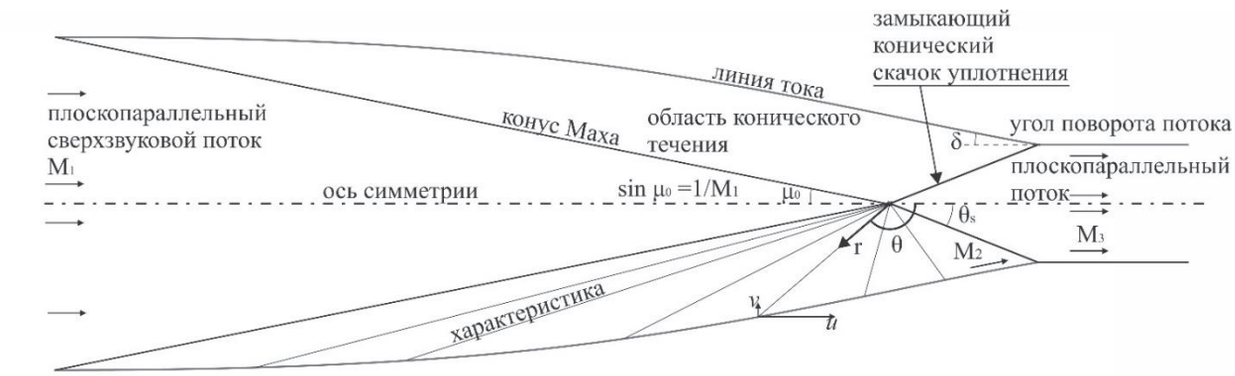


Рис. 1. Диффузор Буземана

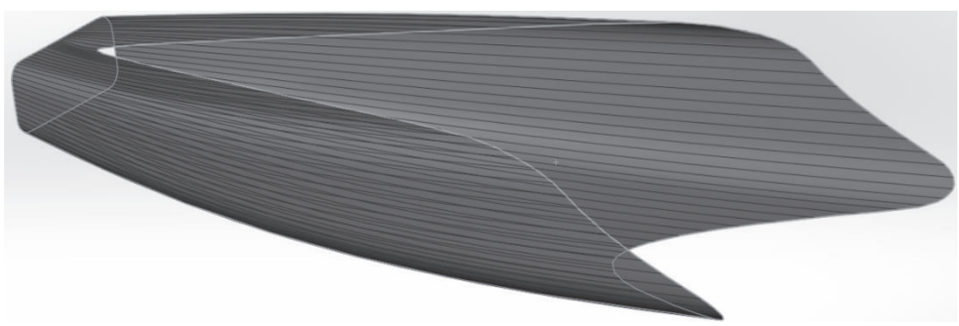


Рис. 2. Сформированный облик воздухозаборника при входном числе Маха $\boldsymbol{M_1 = 5.1}$ и числе Маха на выходе $\boldsymbol{M_{out} = 3}$

Литература

1. *Буземан А.* Осесимметричное коническое сверхзвуковое течение // Газовая динамика. М: Изд-во иностр. лит., 1950 С. 197–218.
2. *Billig F.S., et al.* Design and Analysis of Streamline Traced Hypersonic Intakes // AIAA Paper 1999–4974, 1999.
3. *Busemann A,* Drücke auf kegelförmige Spitzen bei Bwegung mit Überschallgeschwindigkeit // Zs. angew. Math. u. Mech., 9, 496, 1929.
4. *Taylor G.I., Maccoll I.W.* The air pressure on a cone moving at high speeds // Proc. Roy. Soc. A, 139, 278, 1933.
5. *Никольский А.А* О течениях газа вблизи остроконечных задних кромок тел вращения // Сборник теоретических работ по аэродинамике. М.: Оборонгиз, 1957. С. 74–76.
6. *Гродзовский Г.Л.* Сверхзвуковые осесимметричные конические течения с коническими скачками, граничащими с параллельным равномерным потоком // Прикл. Математика и механика. 1959. Т.23, № 2 С. 379–383.
7. *Mölder S.* Internal, axisymmetric, conical flow // AIAA Journal, Vol. 5, No. 7, 1967, pp1252–1255.
8. *Крайко Н.И., Тилляева Н.И.* Осесимметричные конические и локально-конические течения без закрутки // Прикл. Математика и механика. 2014 Т.55, № 2 С. 108–126.
9. *Flock A.K., A.Gülhan* Viscous Effects and Truncation Effects in Axisymmetric Buseman SCRamjet Intakes // 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA SciTech Forum, 2015, AIAA 2015–0108.
10. *Mölder S.* Wavecatcher intakes for scramjets // 18th AIAA/3AF International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, 24-28 September 2012, Tours, France.

11. *Kantrowitz A.* The formation and Stability of Normal Shock Waves in Channel Flow // NACA Tech. Note 1225, March 1947.
12. *Karl S., Steelant J.* Crossflow Phenomena in Streamline-Traced Hypersonic Intakes // AIAA Journal of Propulsion and Power, 0748-4658, P. 1–11, 2017.

Секция физических проблем аэрогидромеханики и авиационной экологии

УДК 537.84

О намагничивающем действии кругового движения проводящей жидкости

С.Ю. Маламанов

Балтийский государственный технический университет «Военмех»

Внесение магнетика в магнитное поле приводит к его намагничиванию. С другой стороны, возникающее внутри магнетика магнитное поле сильно зависит от его формы [1]. Именно эти факты послужили основой для последующего анализа некоторых аспектов силового взаимодействия в системе «магнитное поле – среда». Действие магнитного поля на ток в проводящей среде приводит к электромагнитной силе, силе Лоренца – $\vec{j}\times\vec{B}$, которую следует учитывать в уравнениях движения среды. Плотность тока $\vec{j}$ находится из обобщенного закона Ома.

Сила Лоренца выражена через векторное произведение, наибольшее значение которого, при прочих равных условиях, достигается, когда определяющие его вектора взаимно перпендикулярны. Наиболее простой моделью, в которой можно обеспечить взаимную перпендикулярность векторов $\vec{j}$ и $\vec{B}$, по-видимому, является течение в зазоре цилиндрического конденсатора.

Численное моделирование осуществлялось на базе МГД-уравнений, реализованных в гидродинамическом модуле комплекса ANSYS. Схема течения приведена на рис. 1.

Рассматривается течение проводящей жидкости (морская вода) в кольцевом зазоре двух соосных цилиндров. Задана разность потенциалов между внутренним и внешним цилиндрами; приложено внешнее вертикальное магнитное поле и задано магнитное поле стенки внутреннего цилиндра, равное внешнему полю. Оставляя объем зазора между цилиндрами неизменным, что равносильно постоянству массы жидкости, заполняющей зазор, изменяем радиусы внешнего R и внутреннего r цилиндров. Были рассмотрены случаи

$$\frac{r}{R}=0,34;\ 0,6\ \text{и}\ 0,85.$$

Первый случай соответствует наиболее «широкому» зазору, тогда как третий – наиболее «тонкому». Значения радиусов были следующие:

$$R=1,0\ \text{м},\qquad r=0,6\ \text{м},$$

которые затем изменялись:

$$\frac{r}{R}=0,34\ \text{при}\ R=1,0\ \text{м};\quad \frac{r}{R}=0,85\ \text{при}\ R=1,5\ \text{м}.$$

Результаты моделирования представлены на рис. 2. По горизонтальной оси рисунка отложено приведенное расстояние вдоль радиуса, по вертикальной – величина относительной вертикальной компоненты индуцированного магнитного поля B_z.

Из рисунка следует, что по мере уменьшения толщины щелевого зазора, величина индуцированного поля возрастает. Причем это возрастание очень сильное – кратное. Понятно, что меньшему зазору соответствует большая площадь, омываемая жидкостью.

Таким образом, можно говорить о том, что параметр, равный отношению радиусов внутреннего и внешнего цилиндров, является намагничивающим фактором, при круговом движении проводящей жидкости в зазоре постоянного объёма коаксиальных цилиндров во внешнем однородном магнитном поле, направленном вдоль оси цилиндров.

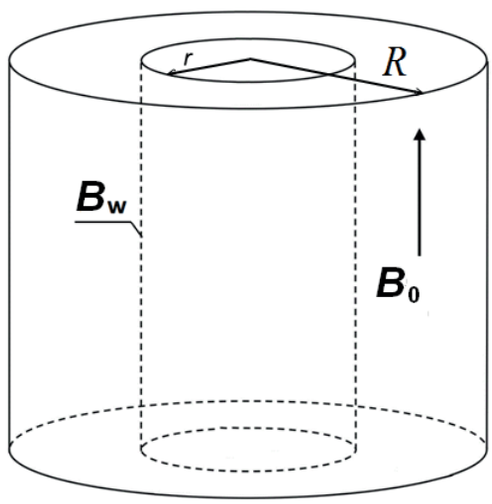


Рис. 1. Схема течения в кольцевом зазоре при наличии вертикального магнитного поля и заданной намагниченности внутренней поверхности $B_W = B_0$

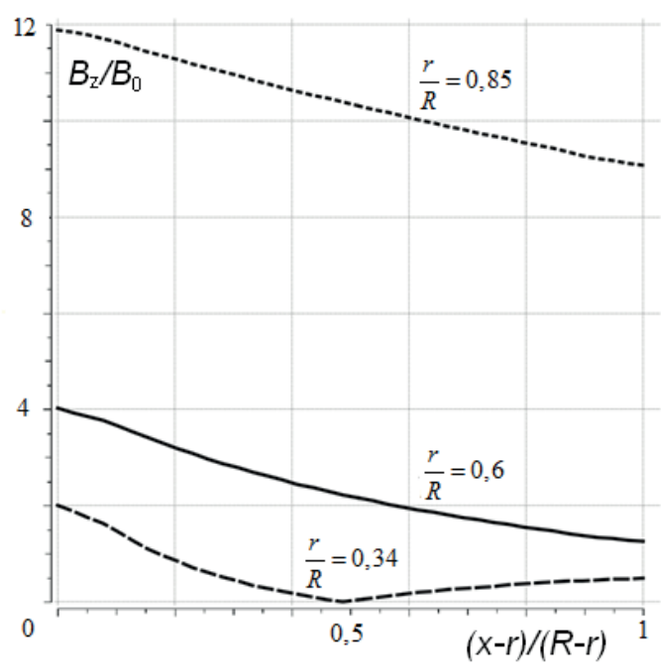


Рис. 2. Распределение индуцированного магнитного поля при различных толщинах кольцевого зазора, но при одинаковом объеме внутренней части

Литература

1. *Сивухин Д.В*. Общий курс физики в 5 т. Т. 3 Электричество: учебное пособие. М.: Наука. Физматлит, 2009. 656 с.

УДК 532.529.5

Моделирование обледенения профиля в потоке, несущем сфероидальные кристаллы

А.В. Кашеваров[1], А.Л. Стасенко[1,2]

[1]Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского
[2]Московский физико-технический институт (государственный университет)

Рассмотрена проблема численного моделирования мало изученного типа обледенения летательного аппарата при полёте в высотных облаках, содержащих кристаллы льда, когда происходит их налипание на тёплых элементах конструкции двигателя. Разностороннее изучение этого типа обледенения проводилось в рамках проекта [1]. В частности, в аэрохолодильной трубе исследовалось взаимодействие ледяных кристаллов с подогреваемой лобовой поверхностью аэродинамического профиля [2]. В настоящем докладе описывается физико-математическая модель простейшего режима обледенения этого профиля без образования жидкой плёнки.

Модель включает в себя уравнения движения кристаллов сфероидальной формы в несущем воздушном потоке. Его поле скоростей вокруг изменяющейся со временем формы профиля рассчитывалось на основе метода приближённых конформных отображений [3]. Численно исследовано влияние несферичности частиц и их ориентации в потоке на зону орошения профиля в предположении одинаковой и неизменной ориентации частиц в процессе движения. Далее, предполагалось, что при ударе о поверхность происходит частичное разрушение кристалла за счёт как нормальных, так и сдвиговых напряжений и часть его массы остается на поверхности вблизи точки столкновения.

Входными данными расчетов являлись параметры, характерные для экспериментов [2]: скорость набегающего потока 50 м/с, его температура 263 К, содержание кристаллов в набегающем потоке 5 г/м^3. На рис. 1 показана рассчитанная картина нарастания льда на передней полуцилиндрической части профиля в случае хаотической ориентации сплюснутых (отношение полуосей 0.1) сфероидальных кристаллов (радиус объемно-эквивалентного шара 50 мкм). Она получена осреднением соответствующих картин для 133 фракций, все частицы каждой фракции ориентированы одинаково, а шаг между углами, характеризующими ориентацию, для двух соседних фракций составляет 15^o. Для сравнения на рис. 1 представлена эволюция нарастания льда для сферических кристаллов того же радиуса. Видно, что темп обледенения, вызванного сплюснутыми сфероидами, в несколько раз меньше, чем в случае сфер.

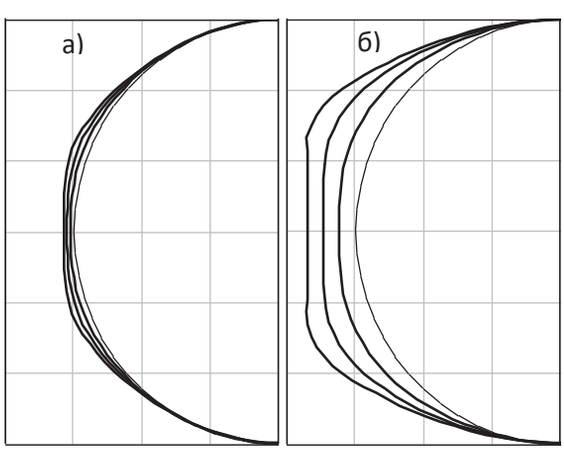


Рис. 1. Нарастание льда на профиле со временем для (а) хаотически ориентированных сплюснутых сфероидальных и (б) шаровых частиц. Шаг по времени 15 с

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект 16-19-10472).

Литература

1. *Dezitter F., Grandin A., Brenguier J.-L., Hervy F., Schlager H., Villedieu P., Zalmansky J.* HAIC (High Altitude Ice Crystals) // 5th AIAA Atmospheric and Space Environments Conf. 2013. AIAA-2013-2674.
2. *Miller A.B., Potapov Y.F., Stasenko A.L*. Experimental and theoretical investigations of aircraft icing in the case of crystal and mixed-phase flow // 29th Congress Intern. Council of the Aeronaut. Sciences, Sep. 7–12, 2014. St-Petersburg, Russia. Paper 2014–0575.
3. *Кашеваров А.В.* Приближённые конформные отображения в приложении к проблеме обледенения прямого крыла в переохлаждённом облаке // Труды 56-й Науч. конф. МФТИ «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в современном информационном обществе». Аэродинамика и летательная техника. М. Долгопрудный–Жуковский: МФТИ, 2013. С. 82–83.

УДК 537.523.9

Особенности перехода резистивного барьерного разряда в сильнотоковый режим

Ю.В. Маношкин, А.А. Плотников

Московский физико-технический институт (государственный университет)

В работе [1] приведены результаты исследования резистивно-барьерного разряда (РБР) в симметричной системе электродов «игла, перпендикулярная к плоскости» для устойчивого режима т.е. при токах в шнуре разряда менее 100 мкА. Известно, что при дальнейшем увеличении напряжения происходит внезапный переход в сильнотоковую форму. Такой режим отличается отсутствием «электрического ветра» из-за ионизации по всему каналу разряда. В этом случае возможная величина тока разряда определяется параметрами источника и балластного сопротивления, т.е. возможны варианты тлеющего и искрового режимов [2].

В данной работе исследовался переход в РБР для симметричной системы электродов, обеспечивающих одношнуровой режим работы при подборе размеров иглы (диаметр острия менее 100 мкм) и разрядных промежутков g менее 5 мм. На рис. 1 для иллюстрации приведены фотографии разрядного промежутка для положительной полярности иглы до и после перехода. Игла расположена в правой части фотографии.

Установлено, что при положительной полярности иглы переход происходит в момент полного заполнения возбужденными атомами всего разрядного промежутка, т.е. когда интенсивное свечение заполняет весь промежуток. Переход при этом происходит скачкообразно, но при фиксированном токе разряда, зависящем от g.

При отрицательной полярности иглы процесс перехода резко отличается, что показано на рис. 2 для g = 3 мм (игла расположена слева). Область ионизации четко определяется по интенсивному свечению вблизи кончика иглы. Для всех промежутков она имеет характерный размер порядка 100 мкм. В стабильном режиме шнур разряда практически не светится (I = 100 мкА). Затем при увеличении тока возрастает интенсивность свечения вблизи резистивного барьера, а позже из этой зоны формируется утолщенный шнур, головка которого перемещается в сторону иглы.

Возможно, причиной такого поведения является вторичная ионизация, начинающаяся около барьера при наборе электронами дополнительной энергии. Появившиеся при этом положительные заряды притягиваются к катоду, рекомбинируя с летящими навстречу электродами. При повышении напряжения фронт рекомбинации удаляется от барьера.

Ток перехода четко не определяется, он медленно увеличивается, предположительно, из-за нагрева материала барьера или газа с последующим изменением проводимости.

На рис. 3 приведены зависимости тока перехода от величины разрядного промежутка. Переход при положительной полярности коронирующего электрода показан

линией. Переходу при отрицательной полярности соответствует заштрихованная область (из-за отсутствия резкой точки перехода). Переход при отрицательной полярности иглы происходит при меньших значениях тока.

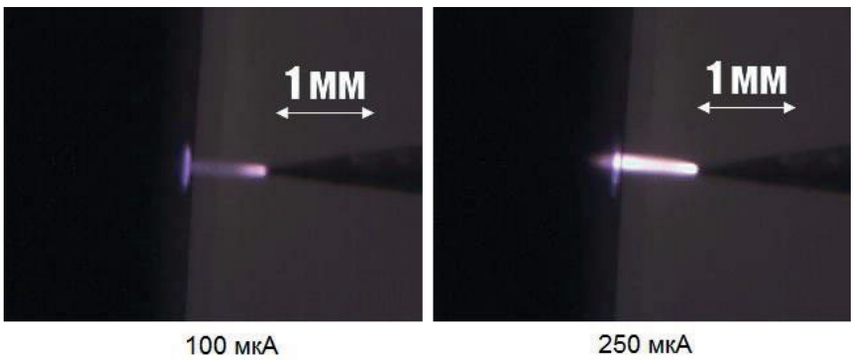


Рис. 1. Переход при положительной полярности иглы

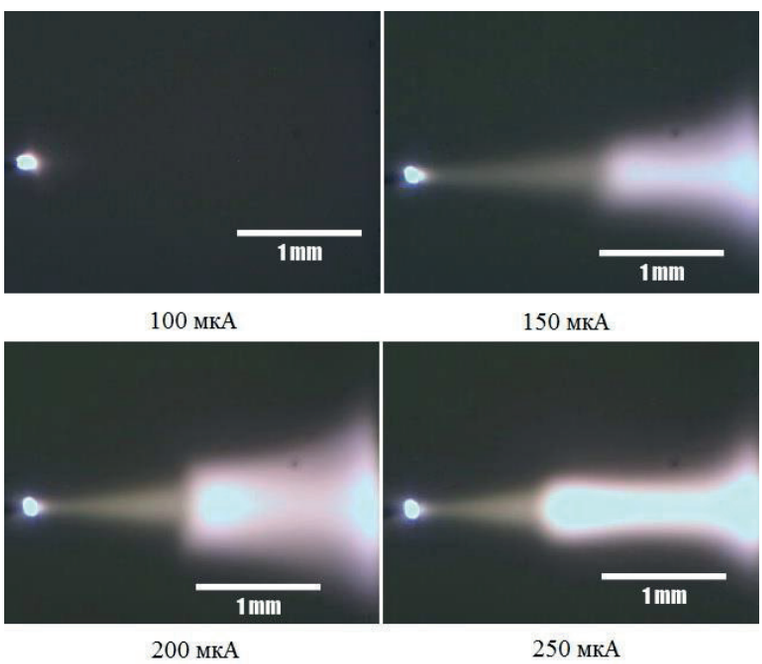


Рис. 2. Переход при отрицательной полярности иглы

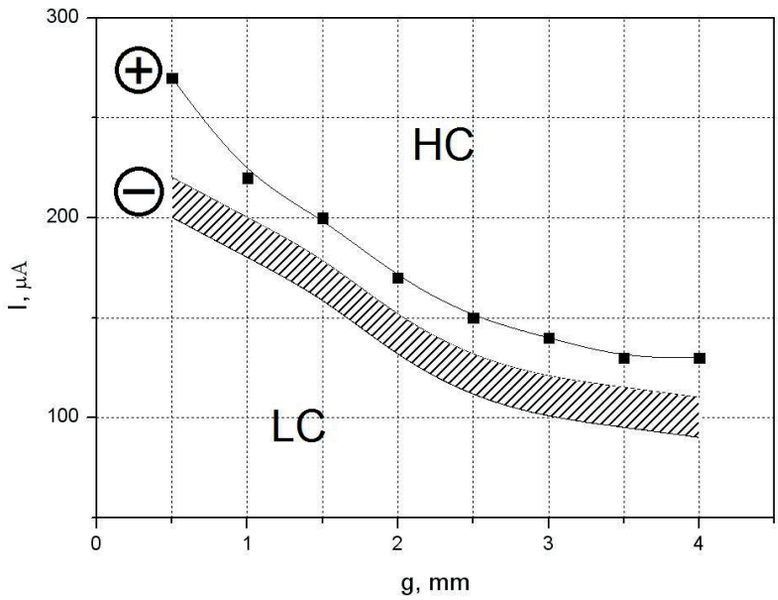


Рис. 3. Зависимость тока перехода от межэлектродного промежутка. HC (high current) – сильнотоковый режим, LC (low current) – слаботоковый (стабильный) режим

Литература

1. *Маношкин Ю.В., Плотников А.А.* Резистивно-барьерный разряд в атмосфере при малых разрядных промежутках для системы электродов «игла-плоскость» // Труды МФТИ, 2017. Т. 9, № 2, С. 64–72.
2. *Akishev Yu., Grushin M., Kochetov I., Karal'nik V., Napartovich A., Trushkin N.* Negative corona, glow and spark discharges in ambient air and transitions between them // Plasma Sources Sci. Technol. 2005, 14, S18–S25.

УДК 537.523.9

Электрический ветер в системах несимметричных электродов

Ю.В. Маношкин, А.А. Плотников

Московский физико-технический институт (государственный университет)

За последнее десятилетие возрос интерес к сверхминиатюрным системам охлаждения для микроэлектроники на основе «электрического ветра», возникающего в слаботоковых униполярных разрядах (коронном (КР), диэлектрически-барьерном (ДБР) и резистивно-барьерном (РБР)) [1, 2]. Подобные устройства отличаются отсутствием подвижных частей и, как следствие, надежностью. В таких системах зачастую используются конфигурации электродов, не обладающие симметрией. При этом в большинстве работ считается, что струя «электрического ветра» по форме совпадает с токовым шнуром, который обычно идентифицируется по фотографии разряда [3], однако такое предположение не имеет под собой достаточного основания. Основной разгон нейтралов воздуха происходит в зоне большого электрического поля – в зоне около иглы. При отсутствии осевой симметрии в системе траектории токового шнура и генерируемой газовой струи уже не будут совпадать. На рис. 1 приведены схематические разрезы типичных электродных систем, в которых наблюдается такое явление. На всех схемах введены следующие обозначения: 1 – игла, 2 – некоронирующий электрод, 3 – резистивный барьер, 4 – токовый шнур, 5 – струя нейтрального газа. В данной работе проводились измерения скорости струи, подтверждающие предположение о несовпадении траекторий «электрического ветра» и токового шнура.

Изображенная на рис. 1а конфигурация неудобна для произведения измерений скорости с помощью трубки Пито.

На рис. 2 приведены типичные фотографии для случаев, показанных на рис. 1б. Относительное расположение электродов выбрано таким образом, чтобы начальный участок токового шнура и соответствующая струя газа были горизонтальными для того, чтобы разместить трубку Пито для измерения скорости струи за пределами токового шнура.

На рис. 3 приведен график уменьшения скорости струи при удалении трубки Пито от коронирующего электрода вдоль оси иглы.

На рис. 4. приведены фотографии для случаев, показанных на рис. 1в. Измерения скорости струи проводились в верхней точке дуги токового шнура, в которой скорость уже ослаблена по сравнению со скоростью в начальной точке шнура. Измерения показали примерно вдважды меньшие значения в сравнении с предыдущим случаем.

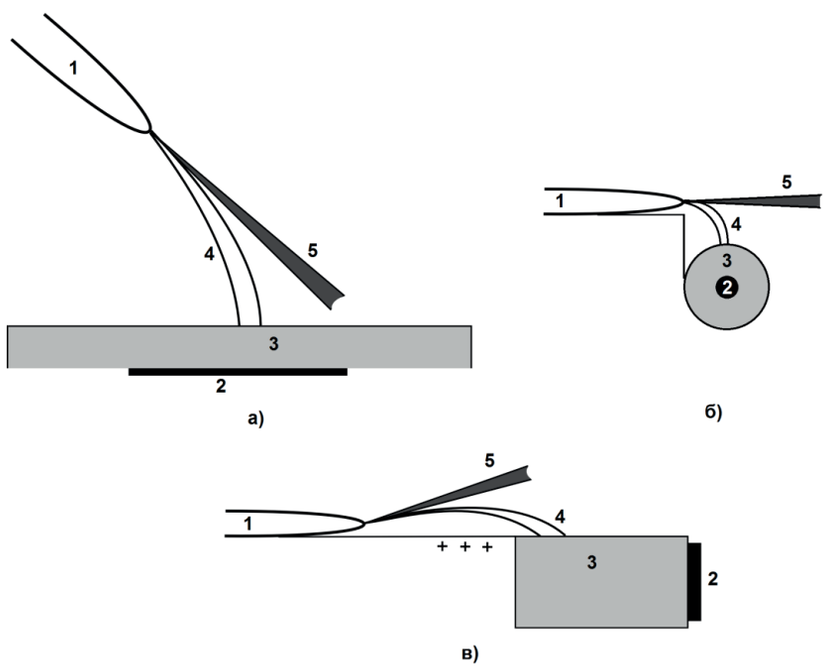


Рис. 1. Схематические разрезы различных конфигураций электродов: а) наклонная игла – плоскость, б) несоосная игла – цилиндр, в) скользящий разряд

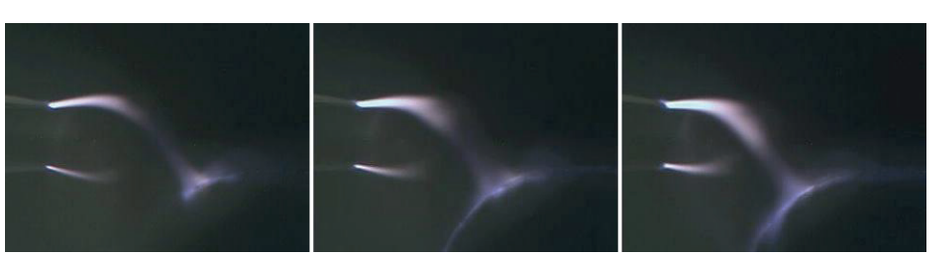


Рис. 2. Фотографии конфигурации, изображенной на рис. 1б

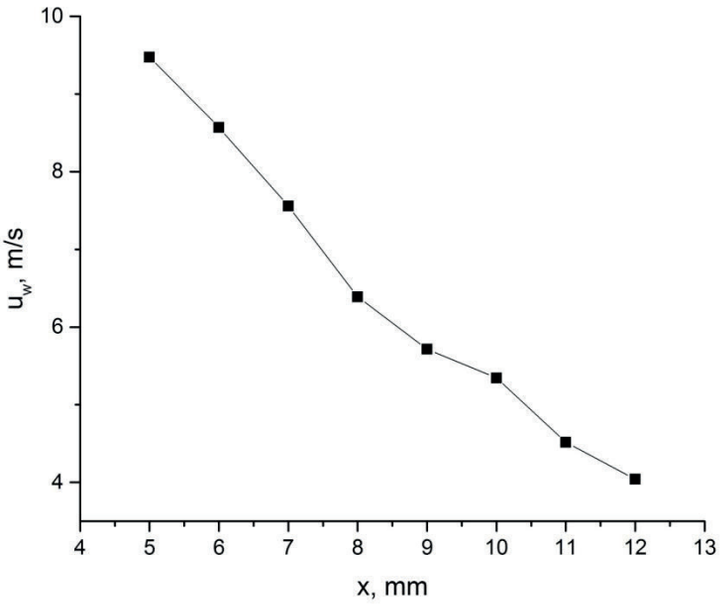


Рис. 3. График уменьшения скорости при удалении от иглы

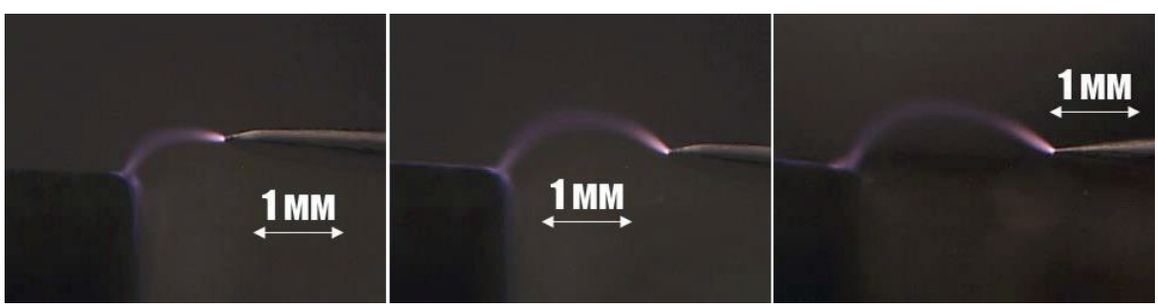


Рис. 4. Фотографии конфигурации, изображенной на рис. 1в

Литература

1. *Tirumala R., Go D.B.* Comparative study of corona discharge simulation techniques for electrode configurations inducing non-uniform electric fields // Journal of Electrostatics. 2014. 72. P.99–106.
2. *Ашихмин И.А., Самусенко А.В., Стишков Ю.К., Яковлев В.В.* Комплексное исследование особенностей электрического ветра от коронного разряда отрицательной полярности // ЖТФ. 2015. Т. 85, вып. 11. С. 65–72.
3. *Дмитриев А.Л., Никущенко Е.М*. О форме тлеющего разряда // ЖТФ. 2017. Т. 87, вып. 5. С. 797–798.

УДК 532.522:532.526:533.694

Исследования воздействия струйных актуаторов на картину обтекания прямоугольного крыла

М.Е. Бондарев, О.М. Карякин, А.Г. Наливайко, М.В. Устинов, Я.Ш. Флаксман

Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского

Использование актуаторов на основе синтетических струй является перспективным способом управления течением на обтекаемых аэродинамических поверхностях. Вопросам оптимизации конструкций струйных актуаторов, их энергетических параметров и воздействия на характер обтекания аэродинамических поверхностей посвящен ряд

экспериментальных работ, опубликованных в последнее время [1–4]. В настоящей работе исследовалось влияние синтетических струй на отрывные зоны, возникающие на верхней поверхности прямоугольного крыла на критических и закритических углах атаки.

В испытаниях использовалась модель прямоугольного крыла с профилем NACA 0012, размахом 600 мм и хордой 300 мм, ограниченного двумя концевыми аэродинамическими шайбами. Модель крыла устанавливалась на поворотном круге в открытой рабочей части аэродинамической трубы Т-129 на консольной державке, оборудованной тензометрическими весами. Задействованный струйный актуатор представлял собой два ряда отверстий на верхней поверхности крыла, из которых истекают струи от генераторов синтетических струй, расположенных внутри модели крыла. Основным элементом каждого генератора является пьезоэлектрическая диафрагма, колеблющаяся с частотой ~ 2.5 кГц и обеспечивающая истечение струй из отверстий. Испытания проводились при скорости набегающего потока 15–25 м/с, в диапазоне чисел Рейнольдса $(0.4–0.6)\cdot10^6$.

С целью определения границ отрывной зоны, возникающей при обтекании крыла на критических и закритических углах атаки, производились измерения распределения полного давления в плоскости, перпендикулярной поверхности крыла, с помощью микронасадка полного напора. Результаты представлены на рис. 1. Для визуализации особенностей обтекания верхней поверхности крыла использовался метод шелковинок, результаты применения которого проиллюстрированы на рис 2.

Полученные результаты, показывают, что вследствие воздействия синтетических струй происходит увеличение критического угла атаки крыла α на 1º. Также происходит увеличение максимального значения коэффициента подъемной силы на 5–10%. При этом наблюдается уменьшение размеров отрывной зоны и ее смещение вниз по потоку на расстояние до 15% хорды. Помимо этого происходит устранение гистерезиса аэродинамических характеристик, возникающего на исследуемой модели крыла [5]. Вышеописанные результаты, обусловлены, по-видимому, интенсивным влиянием множественных вихревых структур, образованных струйным актуатором, которые, воздействуя на пограничный слой, приводят к его ускорению.

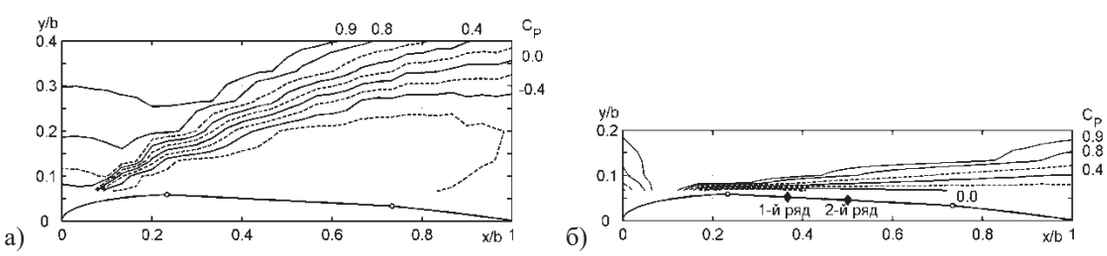


Рис. 1. Распределение коэффициента полного давления C_P над верхней поверхностью крыла при выключенных (а) и работающих (б) генераторах синтетических струй, скорость набегающего потока 25 м/с, угол атаки крыла α = 17°

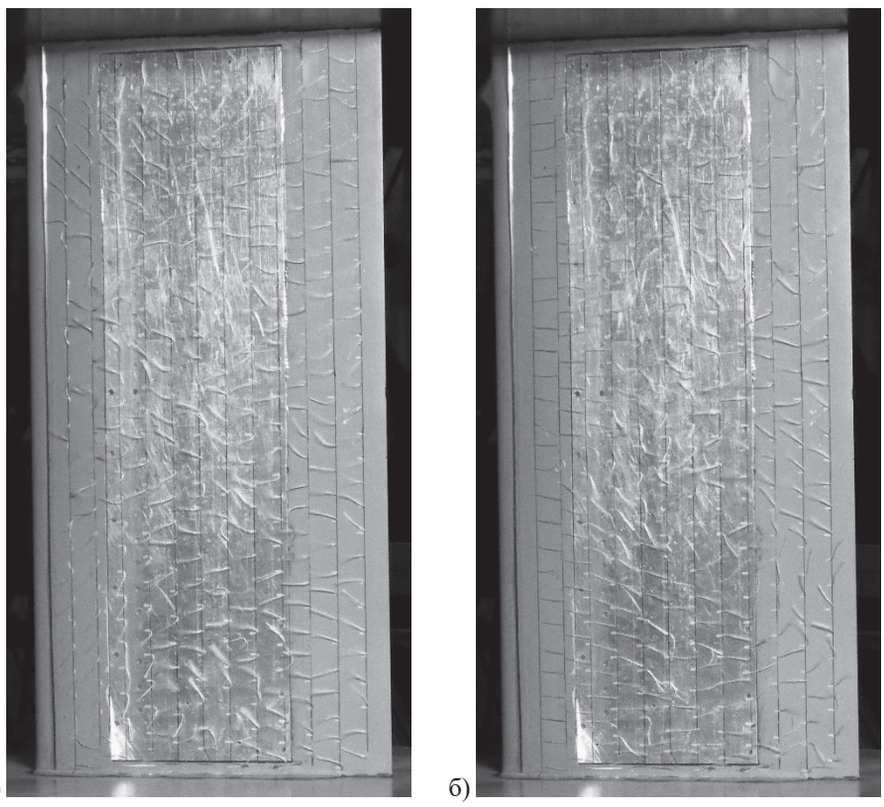


Рис. 2. Визуализация обтекания верхней поверхности крыла методом шелковинок при выключенных (а) и работающих (б) генераторах синтетических струй, скорость набегающего потока 15 м/с, угол атаки крыла α = 16°

Литература

1. *Greenblatt D., Paschal K.B., Yao C.-S., Harris J., Schaeffler N.W., Washburn A.E.* Experimental investigation of separation control. Part. 1: Baseline and steady suction // AIAA Journal. 2006. V. 44, N. 12. P. 2820–2830.
2. *Amir M., Kontis K.* Application of Piezoelectric Actuators at Subsonic Speeds // Journal of Aircraft. 2008. V. 45, N. 4 P. 1419–1430.
3. *Wilson J.S., Martin P.B*. Interaction of Synthetic Jet with Boundary Layer Using Microscopic Particle Image Velocimetry // Journal of Aircraft. 2008. V. 47, N. 2 P. 404–422.
4. *Наливайко А.Г., Урусов А.Ю., Успенский А.А., Устинов М.В., Флаксман Я.Ш.* Экспериментальные исследования управления подъемной силой крыла с помощью распределенных по его поверхности актуаторов // Ученые записки ЦАГИ. 2017. Т. XLVIII, № 1. С. 37–52.
5. *Колин И.В., Суханов В.Л., Трифонова Т.И., Шуховцов Д.В*. Существование и устойчивость внутренних границ области множественного гистерезиса статических аэродинамических сил и моментов // МЖГ. 2002. № 2, С. 199–206.

УДК 532:534.1+531.7/537.9:539

Динамика несферических частиц в газовых потоках

И.А. Амелюшкин, А.Л Стасенко.

Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского
Московский физико-технический институт (государственный университет)

При исследовании и построении моделей динамики дисперсных течений и развитии соответствующих алгоритмов компьютерного моделирования обычно используют предположение о сферической форме частиц и капель дисперсной фазы гетерогенного

потока. Такое предположение вполне оправдано в различных практических приложениях, однако во многих технологических и природных процессах модели сферичной формы могут привести к серьезным ошибкам. В работе [1] показано значительное влияние отношения продольной и поперечной полуосей сфероидов на распределение по поверхности обтекаемого тела потока массы дисперсной фазы и области инерционного осаждения дисперсной фазы на поверхности летательного аппарата в процессе обледенения. Кроме того, известно множество происшествий, вызванных падением отработанных ступеней ракет и элементов космического мусора [2].

В докладе представлены: модель динамики множества несферических частиц в неоднородных потоках в рамках уравнений динамики сплошных сред, модель стохастики кристаллов сложной формы и частиц естественного происхождения. развитые математические модели движения и вращения частиц сложной формы в неоднородных потоках, развитие разработанных ранее [3] алгоритмов решения обратных задач панорамной оптической диагностики гетерогенных потоков, содержащих частицы сложной формы, результаты панорамной оптической визуализации дисперсных течений.

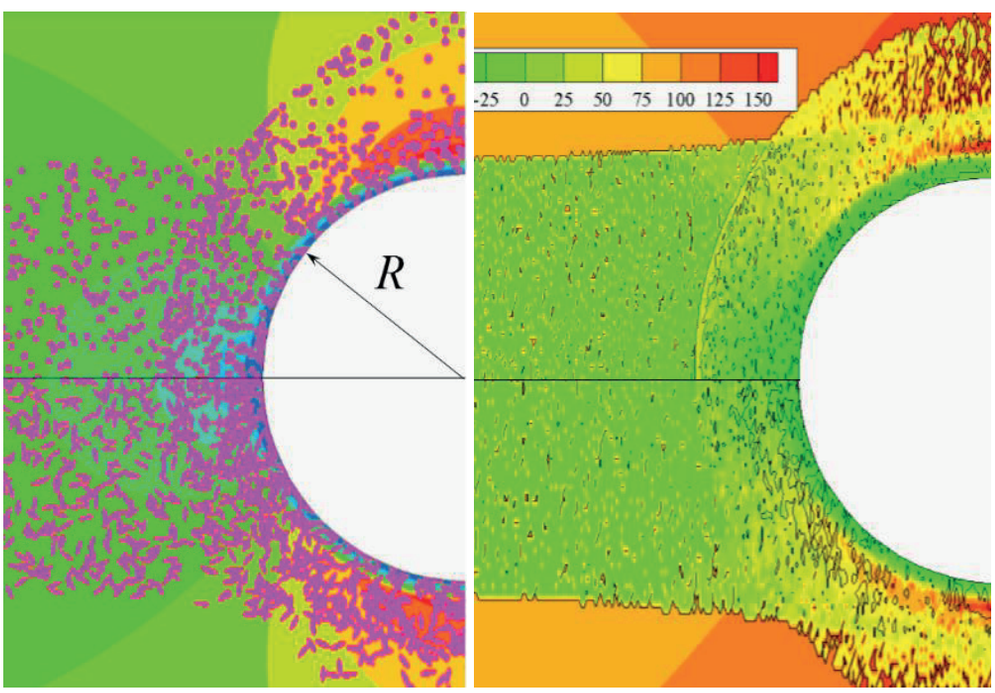


Рис. 1. Влияние несферичности частиц *E* на обтекание кругового цилиндра

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ, проект № 16–19–10472

Литература

1. *Амелюшкин И.А., Стасенко А.Л.* Взаимодействие потока газа, несущего несферические микрочастицы, с поперечным цилиндром // Инженерно-физический журнал. 2018. Т. 91. № 3.
2. *Вениаминов С.С., Червонов А.М.* Космический мусор – угроза человечеству. Второе изд., испр. и дополн. / под ред. Назирова Р.Р., Аксенова О.Ю. Механика, управление и информатика. ISSN 2075-6836. М.: Ротапринт ИКИ РАН. 2013. 208 с.
3. *Амелюшкин И.А., Ганиев Ю.Х., Гобызов О.А., Липницкий Ю.М., Ложкин Ю.А., Филиппов С.Е.* Неравновесный аэрозольный поток в сверхзвуковой аэродинамической трубе // Ученые записки ЦАГИ. 2017. Т. 1 С. 53–71.

УДК 539.2

Расчет колебательных спектров двухвалентных катионов в биокристаллических наноструктурах

В.М. Кузнецов[1], К.Б. Терешкина[2]

[1] Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева
[2] Институт химической физики им. Н.Н. Семёнова РАН

Методами методами ab initio с использованием универсального пакета квантово-химических программ Firefly с наборами базисных функций 6-31G(d,p), 6-31G++(d,p) [1] рассчитаны параметры колебательных спектров сольватированных ионов $Ca(H2O)_6^{2+}$, $Mg(H2O)_6^{2+}$, $Mg(H2O)_{13}^{2+}$ и др.

Обнаружено, что фрактальные размерности этих спектров лежат в диапазоне $d_f \approx 0.4 \div 0.6$, а отношение характерных частот (температур) границ спектра изменяется в пределах $\omega_{max}/\omega_{min} \approx 6 \div 16$. От этих значений зависит устойчивость кристаллических структур [2], в частности, ионов, различных биокристаллических наноструктур, находящихся в цитоплазме. Кристаллизация возникает в микроорганизмах (бактериях) как средство противодействия неблагоприятным внешним факторам, в частности, при стрессе голодания. При этом процесс кристаллизации регулируется изменением концентраций указанных двухвалентных катионов, препятствуя в той или иной степени работе защитных механизмов организмов.

К.Б. Терешкина благодарит за доступ к компьютерным кластерам для проведения расчётов ЦКП МСЦ РАН, УНУ «Суперкомпьютер МВС-10П», УНУ «Суперкомпьютер «Ломоносов-2»».

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, уникальный идентификатор проекта RFMEFI61616X0070.

Литература

1. *Granovsky A.A.* Firefly version 8. http://classic.chem.msu.su/gran/firefly/index.html.
2. *Кузнецов В.М., Хромов В.И.* Влияние размерности фанонного спектра на устойчивость состояний конденсированных сред // ЖТФ. 2011. Т. 81. № 12. С. 77–82.

УДК 532.529.5

Экспериментальное и теоретическое исследования динамики капель воды по поверхности модели под действием воздушного потока в приложении к проблеме обледенения

Э.С. Гринац[2], В.А. Жбанов[1], А.Б. Миллер[1,2], А.Л. Стасенко[1,2]

[1]Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского
[2]Московский физико-технический институт (государственный университет)

Использование тепловых противообледенительных систем может привести к образованию барьерного льда, одного из самых коварных видов обледенения. Для предсказания мест его образования необходимо хорошо понимать динамику течения жидкости (в виде пленки, ручейков и капель) по профилю крыла.

В данной работе рассмотрено движение капель по поверхности модели под действием воздушного потока различных скоростей. Большинство ранее выполненных работ, например [1–4], посвящено экспериментальным и теоретическим исследованиям процессов деформации воздушным потоком невозмущенной капли, лежащей на поверхностях с различными углами смачивания и предсказанию критической скорости потока, при которой происходит начало движения. Однако данные явления происходят на скоростях порядка 10 м/с и не представляют интереса для самолетостроения. В настоящей работе скорость потока на аэрохолодильном стенде [5] достигала 40 м/с; сопровождающая

эксперименты физико-математическая модель позволяет исследовать аэрогидродинамику капли до бо́льших значений скорости воздуха.

Целью исследований являлось как поиск материалов с максимально возможными водоотталкивающими свойствами (гидрофобность), так и верификация математической модели динамики капли. В ходе эксперимента модель профиля крыла, с установленной на ней гидрофобной пластиной, помещалась в воздушно-капельный поток. Вода, уловленная передней кромкой, перетекала на пластину и двигалась по ней в виде капель. Весь процесс снимался на видеокамеру для последующего анализа. С помощью упрощенных алгоритмов PTV (Particle Tracking Velocimetry) были получены траектории капель и их размеры, измерены поверхностные характеристики пластины, такие как краевой угол и гистерезис краевого угла (разность его значений в передней и задней точках пятна контакта капли с поверхностью).

Построение строгой математической модели затруднено сложностью описания динамики капли (заранее неизвестной формы) в пограничном слое, который изобилует трехмерными и, вообще говоря, нестационарными структурами. Предложенная в настоящей работе физико-математическая модель учитывает силу аэродинамического сопротивления, увлекающего каплю вдоль поверхности тела, и тормозящие силы – как адгезию к поверхности, так и диссипативную силу, связанную с движением жидкости внутри капли. Газодинамика обтекающего воздуха исследовалась численно на основе алгоритма, доложенного на одной из предыдущих конференций [6]. В результате сравнения с экспериментальными данными определены подгоночные коэффициенты предложенной полуэмпирической модели.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект 16-19-10472).

Литература

1. *Fu S. C., Leung W. T., Chao C. Y.H.* Detachment of Droplets in a Fully Developed Turbulent Channel Flow // Aerosol Science and Technology. 2014. 48:916–923.
2. *Roisman I .V., Criscione A., Tropea C.* Dislodging a sessile drop by a high-Reynolds-number shear flow at subfreezing temperatures // PHYSICAL REVIEW. 2015. E 92, 023007.
3. *Fan J., Wilson M. C. T., Kapur N.* Displacement of liquid droplets on a surface by a shearing air flow // Journal of Colloid and Interface Science. 2011. 356 286–292.
4. *Ding H., Spelt P. D. M.* Onset of motion of a three-dimensional droplet on a wall in shear flow at moderate Reynolds numbers // J. Fluid Mech. 2008, V. 599. P. 341–362.
5. *Miller A.B., Potapov Y.F., Stasenko A.L*. Experimental and theoretical investigations of aircraft icing in the case of crystal and mixed-phase flow // 29th Congress Intern. Council of the Aeronaut. Sciences, Sep. 7–12. 2014. St-Petersburg, Russia. Paper 2014–0575.
6. *Кашеваров А.В.* Приближённые конформные отображения в приложении к проблеме обледенения прямого крыла в переохлаждённом облаке // Труды 56-й Науч. конф. МФТИ «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в современном информационном обществе». Аэродинамика и летательная техника. М.: Долгопрудный–Жуковский: МФТИ, 2013. С. 82–83.

УДК 532.525.6: 532.529.5

Воздействие на тело осесимметричных и плоских дозвуковых потоков с учётом упруго-пластического и хрупкого разрушений материалов

Г.В. Моллесон[1], А.Л. Стасенко[1,2]

[1]Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского
[2]Московский физико-технический институт (государственный университет)

Дан обзор обширного класса ситуаций взаимодействия частиц высокоскоростных полидисперсных потоков с твёрдым телом канонических форм (сфера, цилиндр, клин), разрушающихся при движении летательного аппарата в льдистых облаках, в запыленных

атмосферах планет, в аэродинамических установках, моделирующих эти условия, а также в технологических процессах, например, при пескоструйной обработке поверхностей. Использованы как классические, так и оригинальные физико-математические модели, описывающие результат столкновения отдельной сферической частицы с поверхностью тела.

Эти модели содержат физико-механические свойства материалов обоих участников взаимодействия (плотности, модули упругости, пределы текучести…), а также газодинамические параметры потока (температуры, давление, скорость обтекания). Последний описывается в рамках известных k-ε или q-ω моделей с учётом обратного влияния частиц на характеристики турбулентности.

Приведены иллюстрации численного исследования аэродинамических потоков с частицами металлов (Al, Fe, Cu) и их окислов. Особое внимание уделено обтеканию тел воздухом, несущим капли воды и/или кристаллы льда, в рамках одной из нерешённых проблем авиации – обледенения летательных аппаратов. В частности, в пространстве определяющих параметров взаимодействия найдены области, в которых кристаллы либо разбиваются на мелкие осколки, медленно движущиеся в пограничном слое и примерзающие к телу ниже по течению, либо отражаются от тела. В последнем случае приобретённое при столкновении вращение частиц и соответствующая сила Магнуса значительно влияет на их траектории и, следовательно, на координаты точек возможного столкновения с другими элементами конструкции летательного аппарата.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект 16-19-10472).

УДК 532.529:532.6

Исследования аккреции льда на нагреваемой поверхности крыла при обтекании воздушно-кристаллическим потоком

В.А. Жбанов[1], А.В. Кашеваров[1], А.Б. Миллер[1,2], Ю.Ф. Потапов[1], А.Л. Стасенко[1,2]

[1]Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского
[2]Московский физико-технический институт (государственный университет)

Рассмотрены результаты экспериментальных исследований образования барьерного льда на модели профиля крыла с подогреваемой передней кромкой в условиях кристаллического обледенения для случая первоначально сухой теплой поверхности и для поверхности, покрытой искусственно созданной жидкой водяной пленкой. Работа является продолжением исследований [1].

Анализ зависимости массы образующегося барьерного льда от скорости, температуры и водности потока, размеров и формы кристаллов льда, температуры поверхности модели и толщины жидкой пленки является сложной многопараметрической задачей с необходимым глубоким пониманием физики происходящих процессов. Для характеризации процесса обледенения предложен и анализируется эффективный коэффициент превращения соударяющихся с поверхностью кристаллов в барьерный лед.

Проведено теоретическое моделирование задачи попадания кристалла в тонкую водяную пленку, текущую по нагреваемой поверхности модели. Показано, что при эволюции пленки ее толщина возрастает по потоку, однако пленка остается тонкой, что не позволяет образоваться водно-кристаллической суспензии. Вычисленные значения толщины пленки находятся в хорошем соответствии с экспериментально измеренными и результатами других авторов.

Выполненные исследования важны для задач обледенения двигателей и приемников воздушных давлений при полете в кристаллических облаках.

Исследование получило поддержку 7-й рамочной программы Европейского Союза по грантовому соглашению nACP2-GA-2012-314314 (HAIC – Кристаллы высотных облаков) и было в части поддержано Российским научным фондом, грант 16-19-10472.

Литература

1. *Miller A.B., Potapov Y.F., Stasenko A.L*. Experimental and theoretical investigations of aircraft icing in the case of crystal and mixed-phase flow // 29th Congress Intern. Council of the Aeronaut. Sciences, Sep. 7–12, 2014. St-Petersburg, Russia. Paper 2014–0575.

УДК 533.6.011

Эффект высокоскоростного «перехлеста» в ударной волне в рамках априорной аппроксимации функции распределения молекул

М.М. Кузнецов, Ю.Д. Кулешова, Ю.Г. Решетникова, Л.В. Смотрова

Московский государственный областной университет

Явление высокоскоростной поступательной неравновесности заключается в превышении («перехлесте») значений функции распределения пар молекул внутри волны над соответствующими равновесными значениями за волной. Этот эффект был установлен ранее в численных исследованиях структуры ударных волн методом статистического моделирования Монте-Карло [1]. С точки зрения практических приложений наибольший интерес представляет исследование его при протекании неравновесных химических реакций с высокими энергиями активации в сильно сжатых газовых смесях.

В работе рассмотрены основные схемы корректного применения бимодальных распределений типа Тамма–Мотт-Смита, модифицированных для бинарных смесей газов, сжимаемых в ударной волне [1–3].

В рамках каждой из этих схем сформулированы необходимые и достаточные условия эффекта высокоскоростной поступательной неравновесности.

Рассмотрено также эллипсоидальное распределение по скоростям молекул в ударной волне. Оно использовано для анализа эффекта «перехлеста» в сильно диспергированных, т.н. рэлеевских смесях газов. Это распределение позволяет учесть, экспериментально обнаруженную ранее в ударной волне анизотропию поступательных кинетических температур молекул [4].

Показано, что для однокомпонентного (простого) газа эллипсоидальное распределение позволяет построить замкнутую систему уравнений для моментов, входящих в это распределение.

Ранее в численных исследованиях структуры ударной волны было установлено [5, 6], что при переходе от физической переменной – расстоянию внутри волны – к безразмерной относительной плотности газа или его скорости структура ударной волны становится менее зависимой от потенциала взаимодействия молекул. Однако в численных исследованиях такой переход оставался незамкнутым на уровне моментного описания и требовал для замыкания задачи решения кинетического уравнения Больцмана. В настоящей работе показано, что при использовании эллипсоидального распределения, учитывающего анизотропию поля поступательных кинетических температур в ударной волне, такой подход получается замкнутым и при использовании в качестве независимой переменной – безразмерной плотности (или скорости) газа. Кроме того, для этой безразмерной плотности получено аналитическое решение замкнутой системы уравнений моментов, позволяющее вновь вернуться к старой физической переменной – расстоянию внутри фронта волны.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 17-07-00-945А.

Литература

1. *Генич А.П., Куликов С.В., Манелис Г.Б., Черешнев С.Л.* Поступательная релаксация в ударных волнах: препринт ОИХФ АН СССР. Черноголовк. 1991. 68 с.
2. *Башлыков А.М., Великодный В.Ю. Структура ударной волны в газовой смеси* // Журн. техн. физ. 1991. Т. 61. Вып. 8. С. 33–42.

3. *Кузнецов М.М., Кулешова Ю.Д., Смотрова Л.В., Решетникова Ю.Г.* О максимуме эффекта высокоскоростной поступательной неравновесности в ударной волне // Вестник МГОУ. Серия «Физика – Математика». 2016. №3. С. 84–93.
4. *Muntz E.P. and Harnett L.N*. Molecular velocity distribution function measurements in a normal shock wave // Physics of Fluids. 1969. V.12. No. 10. P. 2027–2035.
5. *Hicks B.L., Yen Sh. – M., Reilly B.J.* Shock wave structure and intermolecular collisions laws // J. Fluid Mech. 1972. V. 53. part 1, P. 85–111.
6. *Ерофеев А.И., Фридлендер О.Г*. Перенос импульса и энергии в ударной волне // Известия РАН. Серия «МЖГ». 2002. № 4. С. 120–130.

УДК 533.6.011

Аналитические свойства нелинейной реологии и релаксации макропараметров в ударной волне

М.М. Кузнецов, С.В. Матвеев, Е.В. Молоствин, А.А. Перо

Московский государственный областной университет

В настоящей работе обращается внимание на две следующие теоретические малоисследованные проблемы в структуре фронта ударной волны.

Первая из них связана с представлением движения газа в ударной волне в виде движения континуума с нелинейными законами трения и теплопередачи. Такое представление движения газа в ударной волне основано на результатах статистического моделирования методом Монте-Карло [1, 2]. Наиболее существенным результатом этих численных исследований является представление безразмерных величин напряжения трения и потока тепла в ударной волне в виде нелинейных универсальных зависимостей от двух аналогичных безразмерных величин, являющихся известными законами Ньютона и Фурье для линейного переноса импульса и энергии соответственно.

Для многих практических задач было бы существенным представить эти универсальные зависимости в аналитическом виде. С этой целью, в качестве предварительного результата, в настоящей работе дано обобщение известной зависимости поперечного напряжения в ударной волне, полученной для определенного числа Маха перед волной [1], на его произвольное значение.

Второй малоисследованной проблемой, на которую обращается внимание в этой работе, является аналитическая оценка влияния анизотропии поля поступательных кинетических температур в ударной волне на структуру ударной волны в оболочках звезд. В работе показано, что анизотропия поля поступательных температур в ударной волне существенна и в оболочках звезд.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 17-07-00-945А.

Литература

1. *Yen Sh. M. And Ng.* W. Shock wave structure and intermolecular collisions laws // J. Fluid Mech. 1974. V. 65, part 1. P. 127–144.
2. *Ерофеев А.И., Фридлендер О.Г.* Перенос импульса и энергии в ударной волне // Известия РАН. Серия «МЖГ». 2002. № 4. С. 120–130.

УДК 534.213.4

Особенности настройки системы динамиков для генерации звукового поля с заданной азимутальной структурой в цилиндрическом канале

М.А. Яковец[1,2], Н.Н. Остриков[1], М.С. Ипатов[1]

[1]Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского
[2]Московский физико-технический институт (государственный университет)

Настоящая работа посвящена проблеме настройки генератора звуковых азимутальных мод в канале модели воздухозаборника с помощью решетки динамиков. Маломасштабная модель воздухозаборника с внутренним диаметром 20 см содержит 12 встроенных громкоговорителей MJ-1T, расположенных по кругу и питаемых от генератора сигналов типа B&K 3560. Звуковое поле в канале измеряется с помощью решетки из 26 микрофонов B&K 4957, установленных регулярно у открытого конца канала заподлицо, а комплексные амплитуды азимутальных мод с числами $-12 \le m \le 13$ извлекаются стандартным разложением Фурье.

Рассмотрены различные методы настройки системы динамиков и разработан высокоточный метод настройки генератора азимутальных мод с учетом разных электроакустических параметров динамиков. Результаты настройки системы генерации мод показали, что на всех частотах имеются значения параметров, при которых доминирует ряд мод, превышающих амплитуду остальных более чем на 5 дБ. Кроме того, существуют значения параметров, при которых доминирует только одна азимутальная мода, что не может быть реализовано с совершенно идентичными акустическими драйверами.

Разработанный метод был испытан в заглушенной камере АК-2. Генерировались целевые вращающиеся моды с азимутальным числом от 0 до 6 с полученной настройкой для значений величин сигналов и фазовых сдвигов. Было показано, что среднее отклонение измеренного распределения амплитуд азимутальных мод от заданных значений растет с частотой и составляет 1.2 дБ для всех распространяющихся мод и 0.35 дБ для доминирующих на частоте 9500 Гц.

Полученный высокоточный алгоритм настройки генератора мод будет использован для изучения особенностей распространения и излучения из канала воздухозаборника различных азимутальных вращающихся мод.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по соглашению №14.625.21.0038 (код RFME-FI62516X0038).

УДК 539.3

Моделирование термоискажений, возникающих в зеркалах под воздействием теплового потока

И.А. Мартынов[1], Д.А. Леманский[2]

[1]Московский физико-технический институт (государственный университет)
[2]ПАО «НПО «Алмаз»

В последнее время в связи с развитием оптических систем высокой мощности появилась потребность в моделировании прохождения электромагнитной волны высокой мощности через тракт, состоящий из ряда отражающих поверхностей и воздушных коридоров [1]. Данная работа была сформулирована в ПАО «НПО «Алмаз» и реализована в Лаборатории информационных технологий и прикладной математики при ФАЛТ МФТИ в рамках проекта с шифром «Кондиция».

В данной работе рассматривается задача, связанная с построением модели отражающих поверхностей и их взаимодействия с электромагнитной волной. Излучение, частично поглощаемое отражающей поверхностью, нагревает поверхность и создает

внутренние напряжения, связанные с температурными градиентами, которые ведут к искажению поверхности. Величина этих искажений считается значительной по сравнению с неровностями поверхности, возникающими еще на стадии изготовления изделия, поэтому необходимо учесть эффект термоискажений в зеркалах, который будет играть значительную роль в отражении волны и влиять на ее дифракционную расходимость.

Задача моделирования взаимодействия луча с отражающей поверхностью в основном состоит в решении задачи термоупругости, в рамках которой требуется найти искаженную, вследствие нагрева, форму поверхности для учета этого искажения. Задача включает в себя решение уравнения теплопроводности для нахождения поля температур и расчет по найденному полю термоискажения поверхности. Можно показать [2], что решение задачи при условии малости поперечных градиентов температур можно свести к разбиению поверхности на малые стержни и решению задачи для каждого стержня, что позволяет перейти к квазиодномерной постановке задачи. Была написана неявная разностная схема первого порядка точности для решения трехмерного уравнения теплопроводности методом расщепления [3], проведено моделирование искажений, возникших в прямоугольной пластине вследствие температурных напряжений.

Искаженный вид отражающей поверхности представлен на рис. 1.

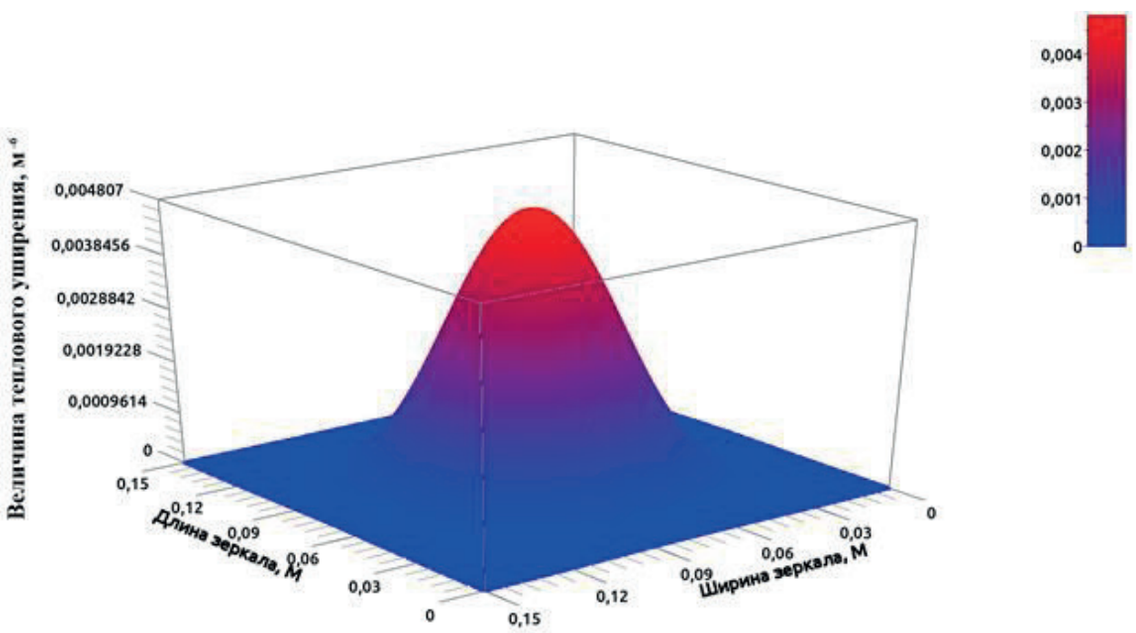


Рис. 1. Искаженный вид отражающей поверхности

Литература

1. *Малашко Я.И., Наумов М.Б.* Системы формирования мощных лазерных пучков. М.: Радиотехника, 2013.
2. *Klein C.A.* Materials for high-power laser optics: figure of merit for thermally inducted beam distortion. Optical Engineering. 1997. V. 36 № 6.
3. *Яненко Н.Н.* Метод дробных шагов решения многомерных задача математической физики. Новосибирск: Наука, 1967.

УДК 538.953

Теоретическая оценка параметров уравнения состояния Ван-дер-Ваальса, коэффициентов вязкости и теплопроводности аргона

Ю.Е. Маркачев

Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского

В настоящей работе дается теоретическая оценка параметров *a* и *b* уравнения состояния Ван-дер-Ваальса, коэффициентов вязкости и теплопроводности для реального газа на примере аргона. Эмпирические параметры *a* и *b*, входящие в уравнение Ван-дер-Ваальса, в первом приближении могут быть выражены через константу равновесия реакции димеризации атомов аргона [1]. Для вычисления константы димеризации необходимо знание колебательно-вращательных уровней энергии связанных и метастабильных димеров. Для вычисления энергий уровней численно с использованием алгоритма Нумерова решается соответствующее одномерное радиальное уравнение Шредингера. В качестве парного потенциала взаимодействия атомов аргона используется аналитическая функция, полученная на основе высокоточных расчетов ab initio [2]. Полученные выражения для параметров *a* и *b* имеют вид функций, зависящих от температуры.

Полученное уравнение состояния аргона тестируется с привлечением доступных экспериментальных данных, обработанных в работе [3].

Для теоретической оценки коэффициентов вязкости и теплопроводности аргона при различных значениях температуры и давления оценка плотности производится с использованием полученного уравнения состояния. Сами же значения коэффициентов вязкости и теплопроводности рассчитываются как коэффициенты вязкости и теплопроводности газовой смеси [4], состоящей из мономеров и димеров аргона, причем равновесные концентрации мономеров и димеров рассчитываются с использованием полученных констант равновесия реакции димеризации при заданных значениях температуры и давления. Найденные таким образом коэффициенты вязкости и теплопроводности аргона сравниваются с известными экспериментальными данными, обработанными в работе [5].

Обсуждаются границы применения предложенного подхода к оценке термодинамических параметров и транспортных коэффициентов аргона.

Литература

1. *Гелиев А.В., Егоров Б.В., Маркачев Ю.Е.* Квазихимическая кластерная модель реального газа и уравнение Ван-дер-Ваальса // Труды 54-й научной конференции МФТИ «Проблемы фундаментальных и прикладных естественных и технических наук в современном информационном обществе». 2011. С. 120–121.
2. *Jager B., Hellmann R., Bich E., Vogel E.* Ab initio pair potential energy curve for the argon atom pair and thermophysical properties of the dilute argon gas // Mol.Phys. 2009. V. 107, N. 20. P. 2181.
3. *Tegeler C., Span R., Wagner W.* A new equation of state for argon covering the fluid region for temperatures from the melting line to 700 K at pressures up to 1000 MPa // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1999. V. 28, N. 3. P. 779.
4. *Ферцигер Дж., Капер Г.* Математическая теория процессов переноса в газах. М.: Мир, 1976. 554 с.
5. *Lemmon E.W., Jacobsen R.T.* Viscosity and thermal conductivity equations for nitrogen, oxygen, argon, and air // J. Thermophys. 2004. V. 25, N. 1. P. 21.

УДК 624.01

Экранирование конвективного теплообмена

А.Д. Михалева

Московский государственный строительный университет

До 20% потерь тепла в зданиях обусловлено теплопередачей через стены. Одним из факторов теплопотерь является конвективный теплообмен вблизи нагретой стены [1]. Цель работы заключается в предложении способа уменьшения конвективного теплообмена доступными и дешёвыми средствами. Известен способ экранно-вакуумной теплоизоляции конструкций. Однако этот способ применяется в основном в космической технике, в криогенном производстве, в авиации, потому что дорог и технологически сложен, требует создать вакуум. В жилых зданиях на долю теплопотерь за счёт излучения приходится незначительная часть энергии. В основном тепло изнутри зданий теряется за счёт теплопроводности и конвекции [2–4]. В этой работе предметом исследования является только конвекция.

Суть работы заключается в выравнивании температурного поля в пространстве вентилируемого фасада здания между внешней стороной стены и декоративной облицовкой. Обычно это пространство исключают из расчётов, не учитывают тепловые потоки, рассматривают только декоративные свойства фасада. Однако в зазоре между стенками существует градиент температурного поля, потому что, например, зимой внешняя сторона стены здания всегда более нагрета по сравнению с декоративной облицовкой. Следовательно, имеет место свободная конвекция. Плотность конвективного теплового потока определяется уравнением Фурье и прямо пропорциональна градиенту температурного поля: $q = -\lambda \cdot \mathrm{grad}T$, где λ – коэффициент теплопроводности. Если в зазоре вентилируемого фасада уменьшить или даже полностью исключить перепад температур между стенкой и облицовкой, то свободная конвекция также уменьшится или даже полностью прекратится. Сделать это можно только после определения температурных полей в конструкциях.

Если посмотреть на стену здания сбоку, то она представляется отрезком. Значит, можно применить параболическое одномерное уравнение теплопроводности в частных производных. Для корректной формулировки задачи краевые условия требуют отдельного рассмотрения. Сначала вполне можно предложить краевые условия первого типа – термостатирование концов стержня. Это означает, что верхняя и нижняя части стены, выходящие торцами за облицовку, имеют температуру окружающей среды, например 0 ºС. Начальные условия Коши для параболического уравнения в частных производных зависят от внешнего теплового воздействия на стержень. Сначала можно предположить, что в какой-то части стены, а значит, и стержня произошло скачкообразное повышение температуры, например, на 10 ºС. Температуру воздуха в зазоре вентилируемого фасада будем предполагать равной температуре облицовки. При возникновении градиента температуры сразу же появится дополнительная конвекция и дополнительные потери тепла. Материалы стены и облицовки различные, имеют разные коэффициенты температуропроводности – это тоже учитывалось при исследовании. Исследование свелось к решению двух смешанных начально-краевых задач для параболического уравнения в частных производных: $\frac{\partial U}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 U(x,t)}{\partial x^2}$; $U(0,t) = 0$; $U(L,t) = 0$; $U(x,0) = \varphi(x)$, где U – температурное поле, a^2 – коэффициент температуропроводности. Краевые задачи были решены методом Фурье. Решения были получены в виде рядов Фурье. По этим двум решениям была вычислена разность температур $\Delta U = \Delta T$ стенки и облицовки в каждой точке по высоте конструкции. Плотность свободного конвективного потока тепла прямо пропорциональна этой разности температур. Полученные решения в виде рядов Фурье были введены в программу MathCAD-14 для анализа с различными коэффициентами температуропроводности. Были исследованы два вида конструкций. Во-первых, кирпичная стена и тонкий алюминиевый экран с небольшим воздушным зазором между ними. Во-вторых, деревянная стена и тонкий алюминиевый экран. Алюминиевый экран – это фольга.

В каждом варианте были изучены два случая: экран снаружи стены и экран изнутри стены. Коэффициенты температуропроводности были взяты из справочника. Расчётная схема задачи – это два рядом расположенных стержня с термостатированными концами. На один стержень происходит резкое температурное воздействие, в какой-то части стержня температура скачкообразно возрастает. Воздух обладает сравнительно большим коэффициентом температуропроводности по сравнению с рассматриваемыми материалами, для него $a^2 = 1{,}9 \cdot 10^{-5}$ ($м^2/с$), поэтому приближённо можно предположить такое же начальное распределение температуры в соседнем стержне. После температурного удара вследствие, например, открытия и закрытия форточки, температура в обоих стержнях начинает изменяться вследствие теплопроводности, но изменяется она по-разному, поэтому возникает разность температур и дополнительный свободный конвективный теплообмен с потерями тепла. Задача анализа свелась к определению потерь тепла при различных конструкциях, материалах и вариантах установки экрана относительно стены здания.

Даже начальное исследование свободного конвективного теплообмена в зазоре вентилируемого фасада позволило получить важный результат о возможности уменьшения теплопотерь сравнительно простым и дешёвым способом – установкой тонкого листа алюминиевой фольги на внутреннюю сторону декоративной облицовки. Иными словами, перед установкой декоративной облицовки на вентилируемый фасад надо с помощью строительного степлера прикрепить лист тонкой алюминиевой фольги, типа пищевой, на обрешётку, на которую будет крепиться облицовка.

Особенностью предлагаемой конструкции является строгий подбор материалов с вполне конкретными значениями коэффициента температуропроводности. Эти материалы надо расположить в правильном порядке. Например, алюминий с большой температуропроводностью всегда должен располагаться с внешней стороны здания за небольшим воздушным зазором вентилируемого фасада. Пока не удалось обосновать и обнаружить эффект снижения конвективных теплопотерь при внутреннем расположении алюминиевого экрана. Не для всех материалов алюминий будет экранировать свободный конвективный теплообмен в зазоре. Например, замена кирпича, казалось бы, более «теплым» деревом, естественно, улучшит тепловые свойства здания, но не уменьшит конвективный теплообмен в зазоре вентилируемого фасада. В изученных четырёх вариантах экранирования свободного конвективного теплообмена в зазоре вентилируемого фасада только первый вариант позволил обосновать существование эффекта, когда кирпичная стена снаружи экранируется алюминиевой фольгой. Физическая сущность этого явления заключается в быстрой передаче тепла от стены к алюминию, в приблизительно одинаковом распространении тепла по стене и алюминиевому экрану, в максимальном снижении разности температур в большинстве точек между стеной и экраном, в выравнивании температуры воздуха в зазоре вентилируемого фасада для уменьшения свободного конвективного теплообмена.

С практической точки зрения монтаж конвективного экрана не вызывает ни технологических, ни экономических трудностей.

Литература

1. *Михалёва А.Д.* Роль конвективного теплообмена в устойчивости ограждающей конструкции / Строительство — формирование среды жизнедеятельности. Электронный ресурс: сборник трудов XX Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых (26–28 апреля 2017 г., Москва). М-во образования и науки Рос. Федерации, Нац. исследоват. Моск. гос. строит. ун-т. Электрон. дан. и прогр. (73,7 Мб). Москва: Изд-во Моск. гос. строит. Ун-та, 2017. Режим доступа: http://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkrdostupa/ ISBN 978-5-7264-1660-1.С.1023-1025.
2. *Богословский В. Н.* Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха). Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. школа, 1982. 415 с.: ил.
3. *Волков А.А., Б.И. Гиясов Б.И., Челышков П.Д., Седов А.В., Стригин Б.С.* Оптимизация

архитектуры и инженерного обеспечения современных зданий в целях повышения их энергетической эффективности // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. №6, С. 111.
4. *Гиясов Б.И.* Влияние развития инфраструктуры городов на жилую среду// Вестник МГСУ. 2012. № 4.
5. *Фокин К.Ф.* Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М.: Изд. Авок-Пресс, 2006.

УДК 532.542.4

Логарифмический участок профиля скорости в турбулентном пограничном слое

Н.В. Самойлова

Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского

Рассматривается осреднённое течение в плоском турбулентном пограничном слое несжимаемой жидкости. Исследуется классическая двухслойная схема течения с малой по сравнению с толщиной слоя δ пристеночной зоной влияния молекулярной вязкости и основной зоной практически невязкого вихревого течения. Такая схема течения подтверждена экспериментально для больших чисел Рейнольдса $Re > 10^6$.

Как известно, в развитом турбулентном пограничном слое в профиле скорости имеется логарифмический участок, в котором реализуется логарифмическая зависимость скорости от поперечной координаты. Это установлено и многократно подтверждено в экспериментах. Логарифмический участок является своего рода индикатором режима течения. Так в условиях неблагоприятного градиента давления во внешнем потоке сокращение его по продольной координате свидетельствует о приближении отрыва турбулентного пограничного слоя, а при исчезновении его наступает отрыв. В условиях благоприятного градиента давления при достаточно значительном ускорении потока, профиль скорости на логарифмическом участке деформируется, а затем и вовсе разрушается. Такое изменение в профиле скорости свидетельствует о начале процесса реламинаризации. В определенных условия обтекания такое явление нежелательно, так как при изменении знака градиента давления ниже по течению может привести к возникновению ламинарного отрыва.

Особый случай представляет автомодельное течение, которое, как показано теоретически [1], реализуется только в условиях, когда внешнее течение представляет собой сток. В [2] тщательно проведенных экспериментах убедительно показано, что профиль скорости в автомодельном течении является логарифмической зависимостью по всей толщине пограничного слоя за исключением тонкого подслоя влияния вязкости вблизи стенки. На основе этого экспериментального факта в [3] получено решение автомодельной задачи, а также получено условие начала реламинаризации. При решении используется модификация известного закона следа Коулса [4].

Следует отметить, что существование логарифмического участка в турбулентном пограничном слое, обнаруженного и доказанного экспериментально, впоследствии было доказано аналитически, например, на основе метода подобия [5]. В данной работе дано доказательство существования «чисто логарифмического» профиля на автомодельном режиме, и тогда решение автомодельной задачи [3] не требует использования допущения о логарифмическом профиле. Таким образом, автомодельный режим полностью определяется лишь заданной константой в формуле стока и не опирается на эксперимент. Кроме того, на основе метода подобия показано, что логарифмический участок скорости должен исчезать при приближении к отрыву, что также является экспериментальным фактом.

Литература

1. *Таунсенд А. А.* Структура турбулентного потока с поперечным сдвигом. М.: И. Л., 1959, 399с
2. *Jones M. B., Marusic I., Perry A.E.* Evaluation and structure of sink flow turbulent boundary layers // J.

Fluid Mech. 2001. V. 428, P.1–27.
3. *Михайлов В. В., Самойлова Н. В.* Автомодельное и предельное решения уравнений турбулентного пограничного слоя. Условия реализации парадокса Даламбера // Ученые записки ЦАГИ. 2015. Т. XLVI, №3, С. 3–13.
4. *Coles D.* The law of the wake in turbulent boundary layer // J. Fluid Mech. 1956. V.1, Pt 2, P. 191–226.
5. *Михайлов В. В* Применение асимптотических методов к расчёту турбулентного пограничного слоя // ИФЖ 2004, Т. 77, № 5, С. 114–121.

Секция техники и методики аэрофизического и летного эксперимента

УДК 533.6.071.3

Перспективы методов выделения оптических неоднородностей в сечениях зондирующего светового пучка

С.И. Иншаков, Е.Д. Кудрявцева

Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского

Визуализация обтеканий объектов в аэродинамических трубах является неотъемлемой частью исследований характеристик летательных аппаратов. В работе рассмотрены основные принципы наиболее распространенных рефрактометрических методов исследования потоков газов, таких как прямотеневой, теневой и интерферометрический [1]. Последний представлен в двух вариантах: двухлучевом и сдвиговом [2, 3]. Все вышеперечисленные методы являются одноракурсными и интегральными, то есть просвечивание ведётся по одному направлению и отклонение светового пучка определяется всей неоднородностью вдоль его пути. Часто возникает необходимость выделения неоднородности в конкретном сечении светового пучка. Возможно два пути решения этой проблемы: метод острой фокусировки [4] и синтезированной когерентности [5, 6].

Первый – это метод острой фокусировки, нашедший применение в микроскопной оптике и впервые применённый к задачам аэродинамики в 50–60-х годах прошлого века при визуализации течений сквозь перфорированную рабочую часть аэродинамической трубы [4]. Данный метод можно реализовать через оптические окна малого размера или даже сквозь перфорированные стенки рабочей части аэродинамической трубы.

Другим способом выделения сечения является метод синтезированной когерентности, впервые применённый в астрономии для нахождения экзопланет вблизи звёзд [5]. Для задач аэродинамики данный метод предложен в работе [6]. Для получения объемного распределения оптической неоднородности в исследуемом объекте предлагается последовательное объединение двух интерферометров сдвига, отражающих фазовые искажения световой волны в различных сечениях зондирующего светового пучка. Проведено компьютерное моделирование описанных методов и сделаны соответствующие выводы об их практической применимости для выделения неоднородности в сечении.

Литература

1. *Иншаков С.И.* Визуализация структуры газовых потоков теневыми и интерференционными методами // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2017. № 2. С. 108–113.
2. *Нагибина И.М.* Интерференция и дифракция света. Л.: Машиностроение, 1985. 332 с.
3. *Малакар Д.* Оптический производственный контроль. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.
4. *Васильев Л.А.* Теневые методы. М.: Наука, 1968. 400 с.
5. *Тавров А.Ф.* Применение оптической когерентности, учебное пособие. М.: Издательский дом МЭИ, 2012.
6. *Шехтман В.Н.*, *Родионов А.Ю.* Сдвиговой интерферометрический метод исследования объёмного распределения оптических неоднородностей в пространственно протяжённых фазовых объектах // Оптический журнал. 2015. № 4. С-Пб.

УДК 533.6.071.082.5

Применение метода главных компонент для исследования когерентных структур в турбулентном течении газа

Г.Г. Гаджимагомедов[1], Г.Я. Масленников[1,2], Д.С. Сбоев[1,2]

[1]Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского
[2]Московский физико-технический институт (государственный университет)

В аэродинамических трубах (АДТ) с открытой рабочей частью (РЧ) существенная доля пульсационной составляющей в ядре потока вызвана распространением гидродинамических возмущений, генерируемых в пограничном слое (слое смешения) струи кольцевыми вихрями. В ходе работы по разработке гасителей низкочастотных колебаний в дозвуковой АДТ с открытой РЧ возникла необходимость измерить расстояние между вихрями в слое смешения. Однако большое количество мелких вихрей не давало возможности выделить какие-либо структуры. Для обнаружения крупных вихрей использовался метод proper orthogonal decomposition, известный также как метод главных компонент. Этот метод используется при изучении турбулентности для выделения и организации когерентных структур согласно их энергии [2]. В пространстве полей скоростей выделяется базис, состоящий из характерных мод. Исключая наименее энергоемкие моды из базиса, получают отфильтрованный сигнал.

Для получения полей скорости был использован метод particle image velocimetry (PIV). Этот метод основан на измерении скорости взвешенных в потоке светорассеивающих частиц [1]. Измерения проводились на установке АТ-3 ЦАГИ. АДТ имеет сопло прямоугольного сечения размером 575 × 370 мм со скошенными углами. Расстояние от сопла до диффузора L = 1300 мм. Схема рабочей части трубы представлена на рис. 1.

Для исследования структуры течения использовалась система измерения полей скорости PIV «ПОЛИС». Источником освещения служил двойной импульсный твердотельный лазер. Генератор дыма располагался на полу рабочей части трубы так, что дым всасывался потоком в диффузор и возвращался в рабочую часть, проходя весь тракт трубы, что обеспечивало равномерность засева потока частицами трассерами. В качестве средств регистрации использовались две камеры «Видеоскан» 4021 (разрешение 2048 × 2048 пикс) с 60-миллиметровыми объективами. Камеры фиксировали общую область измерения размером 940 × 480 мм.

При помощи обработки по методу главных компонент были выделены крупные вихри в слое смешения и измерено расстояние между ними, что говорит об эффективности метода главных компонент для исследования когерентных структур.

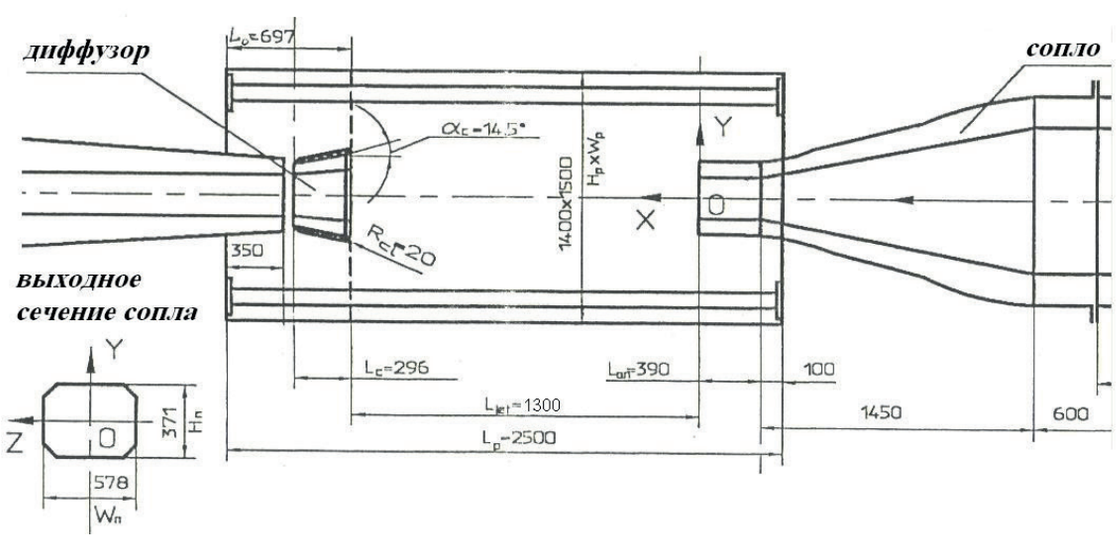


Рис. 1. Рабочая часть АДТ Т-03

Литература

1. *Raffel M., Willert C., Kompenhans J.* Particle image Velocimetry. A practical guide. Berlin: Springer, 1998.
2. *Hamilton N., Tutkun M.* Anisotropic Character of Low-Order Turbulent Flow Descriptions Through the Proper Orthogonal Decomposition // Physical Review Fluids. 2017. V.2.

УДК 533.6.071

Система сбора данных для АДТ малых скоростей Т-03 ЦАГИ

С.А. Баранов, Д.С. Сбоев

Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского

Аэродинамическая труба (АДТ) малых скоростей Т-03 ЦАГИ широко применяется в различных методических исследованиях и пилотных проектах. Установка в настоящее время представляет собой АДТ со свободной струей и камерой Эйфеля. Скорость набегающего потока до 45 м/с, размеры среза сопла 570 × 370 мм, длина рабочей части 1300 мм. Ввиду большой востребованности АДТ возникла необходимость создания для нее автоматизированной системы сбора данных и позиционирования датчиков в потоке.

Пневмометрическая ветвь этой системы к настоящему времени содержит контейнер на 10 датчиков давления фирмы Honeywell серии DC на диапазон 10 дюймов водяного столба с возможностью подключения к своему модулю АЦП. Это позволяет опрашивать любой заданный набор датчиков и в любой последовательности, а также, при необходимости, включать в систему дополнительные контейнеры. Все датчики давления являются дифференциальными, симметричными, имеют термокомпенсацию и встроенный усилитель, нормализирующий сигнал. Характеристика датчиков практически линейна и при индивидуальной калибровке достижима погрешность 0.1%. Для процесса калибровки датчиков давления используется калибратор давления типа FLUKE 719 100G (погрешность измерения давления – 0,035%).

Для определения параметров потока в АДТ измеряются скоростной напор, абсолютное статическое давление в контрольном сечении, температура воздуха в форкамере. Скоростной напор и абсолютное статическое давление в контрольном сечении измеряются с двух любых датчиков давления пневмометрической ветви, температура потока измеряется с линейного прецизионного датчика температуры, расположенного в форкамере серии LM35 (класс точности ±0.25 °C в комнатных условиях и ±0.75 °C в полном диапазоне рабочих температур –55 … +150 °C), показания с которых приходят на свободные каналы модулей АЦП. Атмосферное давление измеряется с абсолютного датчика давления фирмы Honeywell серии XCA, сам датчик расположен внутри контейнера.

Одним из основных методов измерений в Т-03 является термоанемометрия. Имеется возможность подключения однониточных и двухниточных датчиков термоанемометра постоянного сопротивления. Имеется возможность калибровки двухниточного датчика при разных углах его наклона к потоку с помощью прецизионного модуля поворота PRS-200 фирмы Micos.

Управление измерениями, сбор, обработка, отображение и архивирование данных в процессе эксперимента осуществляются посредством управляющего компьютера, в качестве которого используется обычная современная персональная ЭВМ. Основой системы сбора данных является многоканальный модуль NI PCI-6289 разрядностью 18 бит, с 80 входными аналоговыми каналами каждый (от –10 до +10 В) и скоростью опроса до 750 KS/s (суммарно со всех каналов). Модуль АЦП имеет также линии цифрового ввода-вывода в уровнях TTL, что даёт возможность управлять внешними устройствами и вводить цифровую информацию. В данной системе эта возможность используется для переключения аналоговых фильтров Бесселя с цифровым управлением, использующихся в термоанемометрической ветви комплекса.

Подсистема контроля также необходима для управления шаговыми двигателями, приводящими в движение механизм поворота, который используется для калибровки датчиков терморегулятора или скосомера по углам. Управление осуществляется с помощью контроллеров Hydra фирмы Micos, непосредственно подключенных к компьютеру через COM порты. Процесс взаимодействия компьютера с остальными узлами измерительного комплекса, обеспечивающий сбор данных, а также последующую обработку полученной информации, её отображение и архивирование производится в темпе проведения эксперимента в соответствии со специально разработанными программами. Для реализации этого на современном уровне используется система графического программирования LabVIEW фирмы National Instruments, работающая в операционной среде Windows. Что даёт возможность разработки индивидуальной программы под каждый эксперимент. Пример интерфейса одной из таких программ приведен на рис. 1.

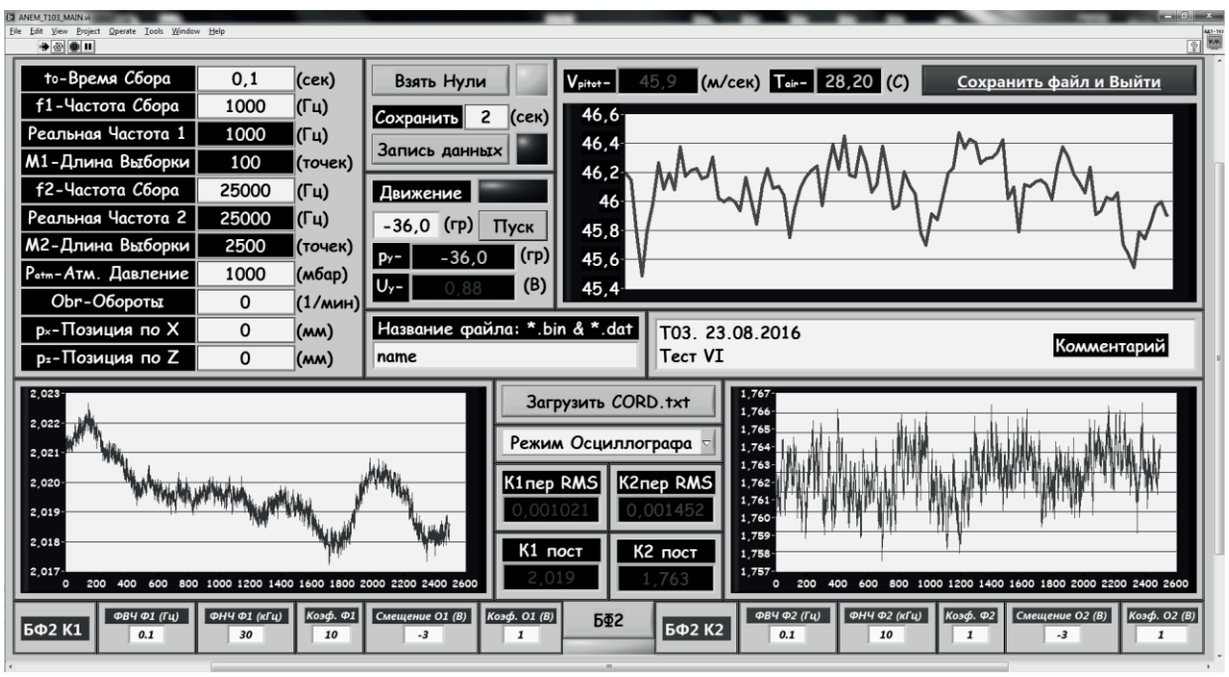


Рис. 1. Интерфейс одной из программ, разработанной в LabVIEW для калибровки двухниточного датчика термоанемометра в АДТ Т-03

УДК 533.6.071

Подготовка АДТ малых скоростей АТ-3 ФАЛТ МФТИ к экспериментам по ламинарно-турбулентному переходу

Т.Т. Нгуен, Д.С. Сбоев, В.В. Ткаченко

Московский физико-технический институт (государственный университет)

Установка АТ-3 представляет собой аэродинамическую трубу (АДТ) малых скоростей незамкнутого типа с закрытой рабочей частью (РЧ) восьмигранного сечения размерами 1200 × 800 × 800 мм. Возраст установки около 80 лет. АДТ не имеет форкамеры, входное устройство выполнено в виде переходящего в сопло коллектора с установленным на входе хонейкомбом. В существующей конфигурации АДТ имеет максимальную скорость набегающего потока 15 м/с и степень турбулентности 0,8%. Исходя из таких параметров установки было принято решение развернуть в ней серию экспериментальных исследований ламинарно-турбулентного перехода в пограничном слое в условиях повышенной степени турбулентности набегающего потока. При этом степень

турбулентности может быть сравнительно легко увеличена установкой турбулизирующих сеток на срезе сопла.

В качестве основной модели была выбрана плоская пластина, позволяющая исследовать переход в пограничном слое, как без градиента давления, так и при небольшом отрицательном градиенте. С этой целью пластина оборудована закрылком. Материал пластины – органическое стекло толщиной 10 мм, длина модели 1000 мм. Передняя кромка выполнена толщиной 4 мм в виде полуцилиндра радиусом 2 мм. При расположении передней кромки модели на расстоянии 200 мм от среза сопла закрылок выступает в диффузор АДТ и может легко регулироваться вручную через люк диффузора. Пластина устанавливается в РЧ вертикально от пола до потолка (рис. 1). Геометрия пластины выбрана исходя из опыта предыдущих исследований.

Основным методом измерений в пограничном слое принят термоанемометрический. Для этого были приобретены два термоанемометра постоянного сопротивления СТА2016 производства ИТПМ СО РАН с частотным диапазоном до 500 кГц при использовании однониточного датчика. Приборы управляются с персонального компьютера (ПК) при помощи интерфейса RS-232 и позволяют проводить измерения в автоматическом режиме.

Автоматизация измерений является важнейшим требованием к современному аэрофизическому эксперименту. Особенно высокие требования предъявляются к точности позиционирования датчика в пограничном слое модели. Для решения этой задачи было разработано и изготовлено двухстепенное координатное устройство, устанавливаемое в РЧ вместо одной из ее стенок (рис. 1). При проектировании с целью сокращения затрат была принята схема, в которой движение датчика по продольной координате осуществляется вручную, а по наиболее важной нормальной к стенке модели координате в пограничном слое датчик перемещается при помощи модуля линейного перемещения с погрешностью позиционирования не хуже 5 мкм. Модуль линейного перемещения управляется при помощи ПК.

Параметры набегающего потока, необходимые как для поддержания режима экспериментов, так и для калибровок датчиков термоанемометра, определяются при помощи двух дифференциальных датчиков давления Honeywell DC01NDR4, датчика абсолютного давления Honeywell 142PC15A и термометра. Датчики давления опрашиваются в автоматическом режиме, температура воздуха вводится вручную. Дифференциальные датчики подключаются к штатному для АДТ комбинированному насадку Прандтля.

Сбор данных базируется на многоканальных АЦП фирмы National Instruments, позволяющих производить опрос с частотой не менее 50 кГц/канал. Программное обеспечение системы управления и сбора данных для АДТ разработано в среде LabView и обеспечивает:

- управление перемещением координатного устройства;
- управление термоанемометром;
- опрос выходов термоанемометра и датчиков давления;
- калибровку датчика термоанемометра;
- индикацию параметров потока и переменного сигнала термоанемометра;
- сбор и сохранение экспериментальных данных.

Таким образом, можно констатировать, что к настоящему времени в АДТ АТ-3 подготовлен отвечающий современным требованиям эксперимент по переходу в пограничном слое. При необходимости описанная выше схема измерений может быть легко адаптирована для измерений в пограничном слое дужек.

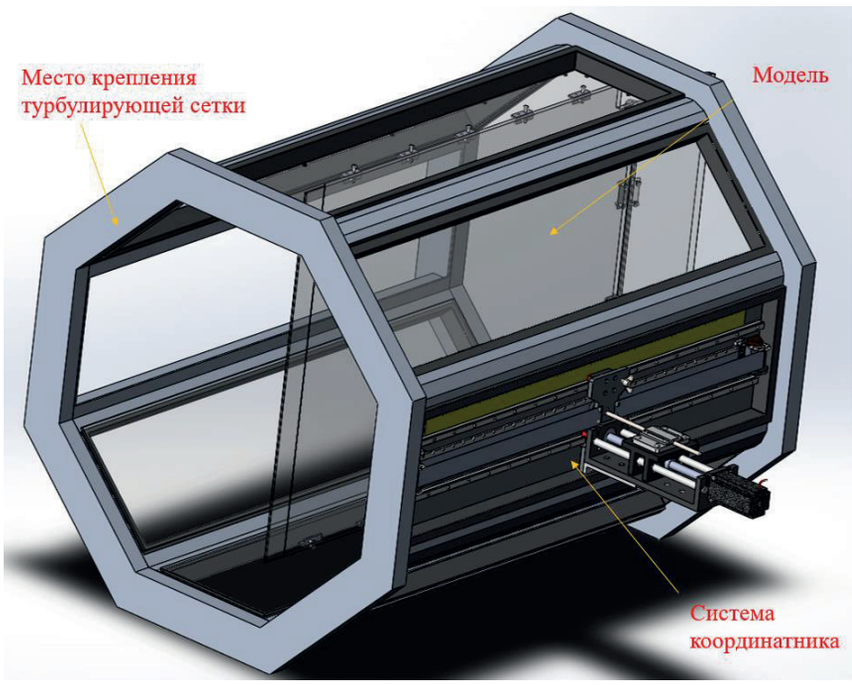


Рис. 1. Трехмерная модель РЧ АДТ АТ-3 с пластиной и координатным устройством

УДК 533.6.07

Привязка системы координат при измерениях деформации модели методом видеограмметрии

М.В. Бусарова, В.П. Кулеш

Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского

При измерениях деформации модели в аэродинамическом эксперименте бесконтактным методом видеограмметрии [1, 2] возникает проблема привязки измерительной (приборной) системы координат к системе координат аэродинамической трубы. Система координат, которая задается в процессе автокалибровки, лишь приблизительно связана с системой координат аэродинамической трубы. Эта связь задается точностью установки модели в исходное нулевое положение, а как показывает практика, эта точность далеко не соответствует требующейся точности измерений. В большей степени это относится к измерениям угла тангажа, так как при изменениях ориентации измерительной системы координат возникают значительные взаимные влияния других углов.

В данной работе предложено привязывать плоскость *Oxy* измерительной системы координат к плоскости движения модели по углу тангажа. Для этого в трубе без потока должно быть получено множество рабочих изображений модели при проходе по углам тангажа в заданном диапазоне углов. Эта процедура условно названа мультиметрией. Предложенный метод был опробован при измерениях деформации полной модели пассажирского самолета в рабочей части №1 аэродинамической трубы Т-128.

Измерения были выполнены видеограмметрическим методом с одной регистрирующей камерой. Для реализации метода мультиметрии была задана параметрическая гипотеза о движении модели, включающая параметры исходного положения модели: смещения *dx* и *dy* модели как целого и угловые отклонения $d\alpha$, $d\beta$ и $d\gamma$. При проходе модели по углам тангажа без потока в режиме имитации было получено 87 изображений в диапазоне угла от –1,9 до +12,8°. Искомые параметры определялись путем минимизации измеренных и заранее известных координат модели во всем множестве

положений модели. Все вычисления по этой процедуре выполнялись с помощью специализированной программы. Найденные параметры преобразования координат при этом оказались равными: dx = 5,0 мм, dy = 14,73 мм, $d\alpha$ = 1,43 °, $d\beta$ = 0,72°, и $d\gamma$ = 0,79°. Результатами этой процедуры стали:

– так называемый образ модели, т.е. координаты маркеров на поверхности модели в привязанной системе координат, наилучшим образом вписывающихся в движение модели по углу тангажа согласно выбранной гипотезе.

– полный комплект значений параметров рабочей характеристики в привязанной системе координат.

Литература

1. «Способ бесконтактных измерений геометрических параметров объекта в пространстве и устройство для его осуществления». Заявка на изобретение РФ № 2013149197 от 06.11.2013 г, патент РФ № 2551396, опубликовано 20.05.15 бюл. № 14, МПК G01B 11/16, автор В.П. Кулеш.
2. *Кулеш В.П.* Бесконтактные измерения геометрических параметров формы, движения и деформации объектов в экспериментальной аэродинамике // Датчики и системы. 2004. №3. С. 22–27.

УДК 533.697.2

Исследование пульсаций в канале воздухозаборника при помощи термоанемометра

Д.В. Ливерко[1], А.В. Ливерко[2], Д.С. Сбоев[1]

[1]Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского
[2]Московский физико-технический институт (государственный университет)

В сообщении приводятся результаты измерений пульсаций в канале воздухозаборника (ВЗ), модель которого устанавливалась в аэродинамической трубе ТПД ЦАГИ. Целью работы являлось исследование пульсационных характеристик течения, для чего использован термоанемометр. Модель имела два канала ВЗ. При этом датчик термоанемометра был установлен в одном из них, а во втором канале устанавливалось 6 гребенок полного давления. Датчик монтировался неподвижно на расстоянии 3.5 мм от стенки канала. Измерения проведены при числах Маха $M = 0$ и 0.4–0.8 в широком диапазоне приведенных расходов $Q_{\square}$, углов атаки □ и скольжения □ модели. Применялся термоанемометр постоянного сопротивления (ТПС) СТА2004 разработки ИТПМ СО РАН и однониточные вольфрамовые датчики с нитью длиной 1.4 мм и диаметром 8 мкм. Частотный диапазон ТПС был не менее 200 кГц. Запись переменной и постоянной составляющих выходного напряжения производилась при помощи АЦП NI PCI-6289 разрядностью 18 бит с частотой сбора 250 кГц. Записывались реализации сигнала длиной 10 с.

Обычно в сжимаемых потоках расшифровка сигнала термоанемометра производится методом диаграмм пульсаций, для чего при постоянном режиме работы установки проводят измерения при нескольких перегревах нити. Это позволяет определить среднеквадратичные относительные пульсации температуры торможения и массового расхода $\langle m \rangle$, но увеличивает длительность эксперимента. Поэтому был использован тот факт, что при больших перегревах нити ТПС малочувствителен к пульсациям температуры и его выходной сигнал практически соответствует пульсациям $\langle m \rangle$. В этом случае для расшифровки сигнала можно применять зависимость $\langle m \rangle$ от относительных пульсаций выходного напряжения в виде $\langle m \rangle = 4\langle e \rangle$, что позволяет проводить измерения при единственном достаточно высоком значении перегрева. В данных измерениях он составлял 1.8. В некоторых режимах для контроля были выполнены измерения при нескольких значениях перегрева и методом диаграмм пульсаций определены частотные спектры $\langle m \rangle$. Их сравнение с полученными упрощенным методом показало прекрасное совпадение.

Таким образом, время измерений удалось значительно сократить и провести их в широком диапазоне параметров обтекания модели.

Анализ полученных сигналов ТПС выявил следующую картину их развития. При постоянных M, □ и □ с ростом Q_{λ} среднее выходное напряжение ТПС и величина пульсаций $\langle m \rangle$ в целом уменьшались (рис. 1), однако это уменьшение было немонотонным. Спектры $\langle m \rangle$ изменялись от характерного для развитого турбулентного пограничного слоя спектра с выраженным интервалом равновесия (наклон спектра $f^{5/3}$, рис. 1) к спектру практически плоскому до частоты 10 кГц с интенсивным затуханием более высоких частот. С возрастанием Q_{λ} энергия низкочастотных пульсаций уменьшалась, а высокочастотных возрастала□ Функции плотности распределения вероятности (ФПР) выходного напряжения претерпевали эволюцию от близких к гауссовским через двухмодовые и сильно перекошенные вновь к распределениям Гаусса (рис. 2). Эти особенности характерны для прохождения около фиксированного датчика ТПС отрывной зоны, перемещающейся внутри канала ВЗ при увеличении Q_{λ} в азимутальном направлении. При этом с ростом Q_{λ} датчик выходит во внешнюю часть пограничного слоя, что объясняет наблюдаемую эволюцию частотных спектров. Эти наблюдения были сделаны на основе данных ТПС и подтвердились при анализе полей полного давления. Приведенный на рис. 3 пример показывает движение области пониженного давления при росте Q_{λ} против часовой стрелки, при $Q_{\lambda} = 0.4$ датчик оказывается на границе этой области. Этот режим соответствует наиболее сильным отклонениям ФПР от распределения Гаусса. При $Q_{\lambda} = 0.65$, как это видно из рис. 3, датчик оказывается во внешней части пограничного слоя. Это полностью соответствует характеристикам измеренного в этом режиме сигнала ТПС.

Таким образом, комбинированными термоанемометрическими и пневмометрическими методами удалось составить достаточно ясное представление о структуре течения в канале ВЗ и особенностях ее развития.

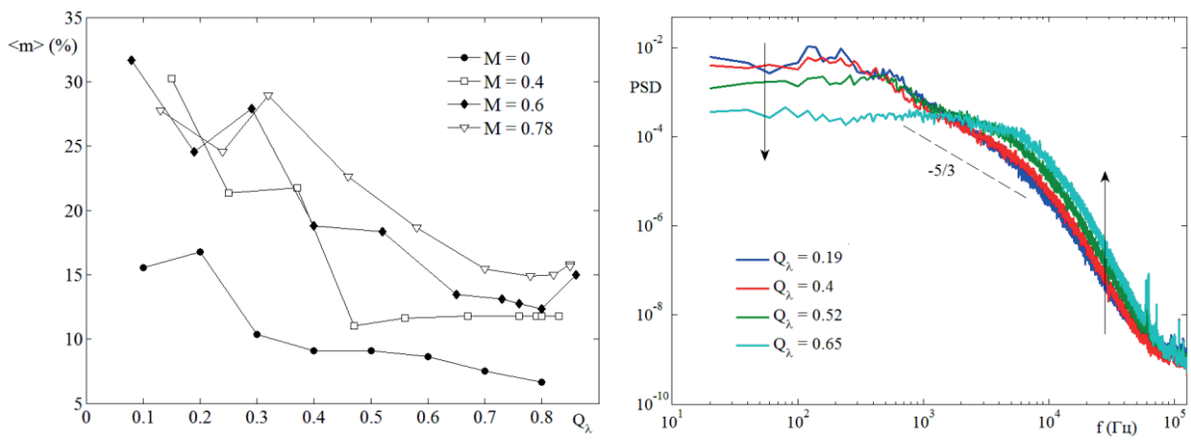


Рис. 1. Зависимости пульсаций массового расхода от Q_{λ} (слева) и эволюция частотных спектров $\langle m \rangle$ при $M = 0.6$, □ = 0, □ = 0 (справа). Стрелками показано направление роста Q_{λ}

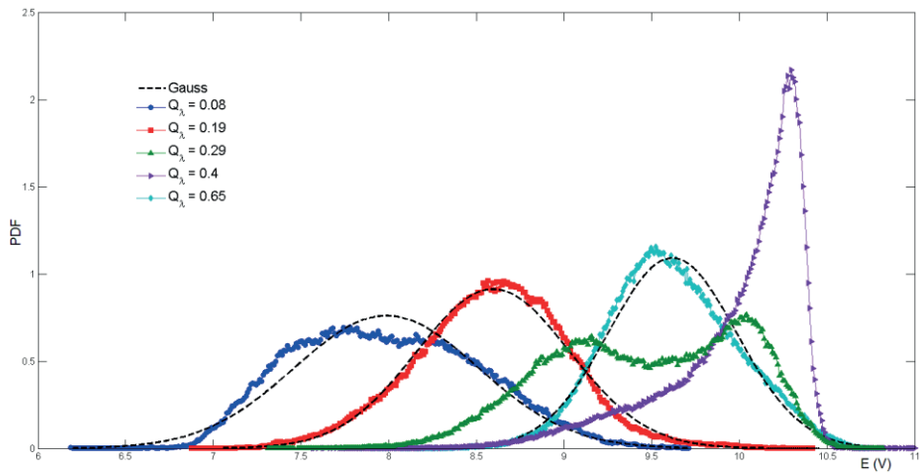


Рис. 2. Эволюция ФПР выходного напряжения при $M = 0.6$, □ = 0, □ = 0

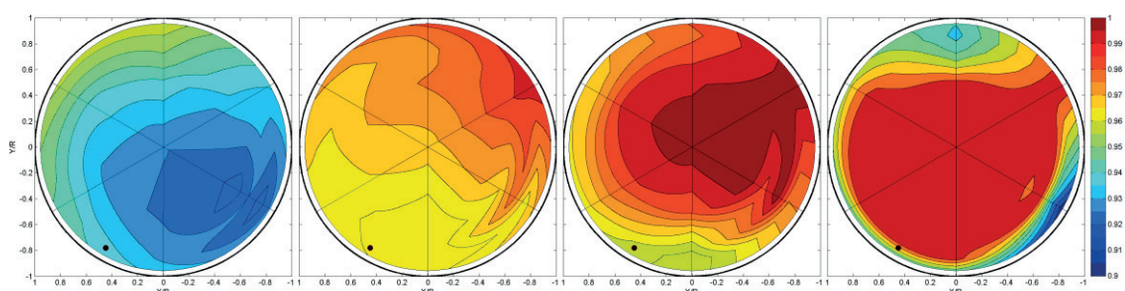


Рис. 3. Эволюция полей безразмерного полного давления в ВЗ при $M = 0.6$, □ = 0, □ = 0. Слева направо: $Q_{□}$ = 0.19, 0.29, 0.4 и 0.65. Черной точкой показано положение датчика ТПС, линиями положение гребенок

Научное издание

Труды
60-й Всероссийской научной конференции МФТИ

Аэрокосмические технологии

20-26 ноября 2017 года

Составители:
М.В. Милов, Ю.О. Алексеева, В.Б. Макарова

Редакторы:
В.А. Дружинина, И.А. Волкова, О.П. Котова, Н.Е. Кобзева

Корректоры:
И.А. Волкова, О.П. Котова, Н.Е. Кобзева

Набор и вёрстка:
М.А. Чайковский

Подписано в печать 12.12.2017. Фомат 60 × 84 $^{1}/_{8}$.
Усл. печ. л. 46. Тираж 65 экз. Заказ № 608.
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт
(государственный университет)»
141707, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9
Тел. (495)408-58-22

"Полиграфия "ПРОДВИЖЕНИЕ"
123592, г. Москва, ул. Кулакова дом 20, стр. 1Б
E-mail: info@prodv.pro
Тел. (495) 988-93-68

ISBN 978-5-7417-0646-6