Труды Всероссийских и Международной научно-технических конференций «Аэрокосмические технологии»

2004-2007 гг.

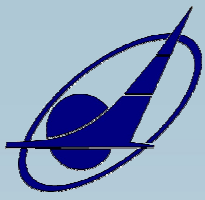
Реутов - Москва

Совместное издание
МГТУ им. Н.Э.Баумана
и ОАО «ВПК «НПО машиностроения»
при организационной поддержке
Союза учёных и инженеров
имени академика В.Н. Челомея

Научные руководители конференций:

Почётный
Генеральный конструктор -
- генеральный директор
ОАО «ВПК «НПО машино-
строения», профессор
ЕФРЕМОВ Г.А.

Ректор МГТУ
имени Н.Э.Баумана,
член-корреспондент РАН,
профессор
ФЕДОРОВ И.Б.



Аэрокосмические технологии

2004-2007

Сборник трудов
ответственный редактор
Симоньянц Р.П.

Москва
Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана
2008

УДК 629.78
ББК 39.53
А 99

А99 **Аэрокосмические технологии, 2004–2007:** Труды Всероссийских и Международной научно-технических конференций (Реутов – Москва, 2004 – 2007) / Под ред. Симоньянца Р.П. – М.: НПО машиностроения, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2008. – 599 с.: ил.

ISBN 978-5-7038-3179-3

В сборнике представлены труды научно-технических конференций «Аэрокосмические технологии»: II-ой Всероссийской (май 2005 г.), III-ей Всероссийской (май 2007 г.), I-ой Международной (май 2004 г.). Включены также материалы Научно-технической конференции молодых специалистов и студентов 2006 г. (НПО машиностроения, МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Рассматриваются проблемы создания аэрокосмических систем; прикладные задачи математического моделирования; компьютерные системы и технологии; динамика движения и системы управления; нелинейная механика и теория нелинейных процессов управления; Вопросы экономики и менеджмента; инновационные процессы и социально-экономическое развитие; новые технологии подготовки специалистов.

Книга рассчитана на широкий круг специалистов в области аэрокосмической техники, инженеров, аспирантов и студентов старших курсов.

УДК 629.78
ББК 39.53

ISBN 978-5-7038-3179-3

© МГТУ им. Н.Э. Баумана,
Аэрокосмический факультет
© ФГУП «НПО машиностроения»
© Союз учёных и инженеров
имени академика В.Н. Челомея

ПРЕДИСЛОВИЕ

С 1987 года на территории НПО машиностроения в подмосковном Реутове начал функционировать Аэрокосмический факультет МГТУ им. Н.Э. Баумана. Ставилась задача подготовки для проектно-конструкторских и исследовательских подразделений предприятия инженеров, способных решать сложнейшие задачи создания аэрокосмических систем. Была разработана принципиально новая в тот период система обучения, основанная на максимально полной интеграции учебного процесса, науки и производства. Создана образовательная технология, предусматривающая глубокое погружение студентов в профессиональную среду предприятия в течение шести лет обучения.

Один из важнейших инструментов этой технологии – совместная проектная и исследовательская работа студентов, инженеров, учёных, преподавателей университета и предприятия. Результаты своих работ студенты традиционно представляют на ежегодных научно-технических конференциях. Из года в год уровень конференций растёт. Сначала они были студенческими. Потом в них стали участвовать инженеры, аспиранты, научные сотрудники, доценты и профессора.

В 2002 году конференция приобрела всероссийский статус (ВНТК-2002). Научные материалы были изданы отдельным сборником: Аэрокосмические технологии: Труды Всероссийской научно-технической конференции (22 мая 2002, г. Реутов, ФГУП «НПО машиностроения»)/ Под ред. Симоньянца Р.П. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 270 с. – ISBN 5-7038-2249-1.

В 2004 г. конференция впервые вышла на международный уровень (МНТК-2004). Перед её началом вышел из печати сборник научных материалов: Аэрокосмические технологии: Материалы Первой Международной научно-технической конференции «Аэрокосмические технологии», посвящённой 90-летию со дня рождения академика В.Н.

Челомея (Российская федерация, Москва – Реутов, 24 – 25 мая 2004) Под ред. Симоньянца Р.П. – М.: изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, НПО машиностроения, 2004. – 430 с. – ISBN 5-7038-2517-2.

В сборник научных материалов МНТК-2004 не вошли доклады и выступления на пленарном заседании. Некоторые из заявленных докладов не состоялись. Ряд интересных докладов, поступивших в оргкомитет уже после выхода из печати сборника, были дополнительно включены в программу конференции.

В 2005 г. состоялась II Всероссийская научно-техническая конференция «Аэрокосмические технологии» (II ВНТК-2005). Она прошла в канун 175-летия МГТУ им. Н.Э. Баумана и 50-летия НПО машиностроения на земле г. Реутова. Состоялось 5 заседаний – пленарное и 4 секционных. Наибольшее число докладов представили научные сотрудники и специалисты НПО машиностроения, профессора и преподаватели МГТУ. Аспирантов и студентов было более 20%.

В 2006 г. на Аэрокосмическом факультете состоялась Научно-техническая конференция молодых специалистов и студентов «Аэрокосмические технологии» (НТК-2006). Инженеры, аспиранты, студенты и их научные руководители представили результаты проектно-исследовательских работ, выполненных ими в НПО машиностроения (С 2006 г. – ОАО «ВПК «НПО машиностроения») и на профильных кафедрах МГТУ.

В 2007 г. в НПО машиностроения проходила III Всероссийская научно-техническая конференция «Аэрокосмические технологии» (III ВНТК-2007). Состоялось 6 заседаний. Основной состав докладчиков – учёные и инженеры НПО машиностроения, профессора, доценты, аспиранты и студенты МГТУ.

В предлагаемом совместном издании ОАО «ВПК «НПО машиностроения» и МГТУ им. Н.Э. Баумана представлены научные материалы всех перечисленных выше конференций. Опубликованные ранее материалы МНТК-2004 в настоящем сборнике нашли отражение лишь в кратком обзоре докладов и сообщений. В полном объёме публикуются только те работы, которые не вошли в упомянутое выше издание 2004 года.

III ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ» Реутов, 23 мая 2007

Предисловие к материалам III ВНТК-2007

23 мая 2007 г. в Реутове, на Аэрокосмическом факультете МГТУ им. Н.Э. Баумана при НПО машиностроения, прошла III Всероссийская Научно-техническая конференция «Аэрокосмические технологии». Организаторами конференции выступили МГТУ им. Н.Э. Баумана и ОАО «ВПК «НПО машиностроения» при поддержке Союза ученых и инженеров имени академика В.Н. Челомея.

Научные руководители конференции: Генеральный конструктор, Генеральный директор ОАО «ВПК «НПО машиностроения», профессор Г.А. Ефремов и ректор МГТУ им. Н.Э. Баумана, член- корреспондент РАН, профессор И.Б.Фёдоров.

Оргкомитет возглавили Р.П. Симоньянц и Е.Г. Куранов. Техническую помощь Оргкомитету оказал Студенческий совет Аэрокосмического факультета. В работе конференции приняло участие 118 человек, из которых 10 докторов наук, 26 кандидатов наук. С докладами выступило 74 человека, в числе которых 9 докторов, 17 кандидатов наук. В числе докладчиков ведущие специалисты предприятия и университета, молодые специалисты и аспиранты. Активное участие в работе конференции приняли аспиранты и студенты, в том числе 14 студентов Аэрокосмического факультета. Краткие сведения об авторах докладов (организация, должность, учёная степень и звание) приводятся в приложении.

Конференция открылась пленарным заседанием. Секционные заседания проходили по 5 научным направлениям:

Секция «*Экономика, инновационные технологии*». Работой секции руководили*:* В.А. Бунак, И.Н. Омельченко и В.С. Акопов.

Секция «*Проектирование аэрокосмических систем*». Работой секции руководили: О.Н. Тушев, М.А. Хомяков и Г.Ф. Реш

Секция «*Математическое моделирование*». Работой секции руководили: В.В. Горский и В.П. Котенев.

Секция «*Динамика движения и управление*». Работой секции руководили*:* Ю.А. Прохорчук и Г.Г. Плавник**.**

Секция « *Компьютерные технологии*». Работой секции руководили*:* В.В. Скоробатюк и Е. В. Галямова**.**

Пленарное заседание:

20 ЛЕТ АЭРОКОСМИЧЕСКОМУ ФАКУЛЬТЕТУ

Г.А. Ефремов

НПО МАШИНОСТРОЕНИЯ ВЫСОКО ЦЕНИТ УЧАСТИЕ УЧЁНЫХ И СТУДЕНТОВ МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА В ЖИЗНИ ПРЕДПРИЯТИЯ

Приветствую всех участников XX научно-технической конференции «Аэрокосмические технологии», которая является также и III Всероссийской, в стенах Научно-производственного объединения машиностроения. Это добрая и полезная традиция.

НПО машиностроения высоко ценит участие учёных и студентов МГТУ имени Н.Э. Баумана в жизни предприятия, развивая все формы совместной работы. Сегодня на конференции будут сделаны и их доклады, и доклады сотрудников предприятия. Надеюсь, что обмен мнениями и идеями окажется не только полезным всем участникам конференции, но и послужит дальнейшему развитию сотрудничества между МГТУ и Открытым акционерным обществом «ВПК «НПО машиностроения».

Акционирование стимулирует предприятие к расширению направлений деятельности. В работе по диверсификации мы также рассчитываем на помощь Университета в подготовке высококвалифицированных специалистов по ракетной и ракетно-космической технике, которые бы могли квалифицированно решать и сложные вопросы в проектах производства гражданской продукции. Основные направления для ВПК «НПО машиностроения»: нефтегазовая, транспортная, информационная, энергетическая, медицинская и коммунальная отрасли. Доля высокотехнологичной гражданской продукции в итоге должна составить до 75% от общего объёма работ предприятия.

О необходимости и важности трансферта современных технологий из оборонного сектора в гражданский сектор экономики, как о важнейшем национальном приоритете говорил в своём недавнем выступлении в МГТУ имени Н.Э. Баумана перед членами Общественной палаты Первый вице-премьер Сергей Борисович Иванов. По его словам, на развитие высокотехнологичных сфер экономики в федеральных целевых программах на ближайшие три года заложена сумма в 1,5 триллиона рублей.

Для ведения множества проектов предприятия также требуются энергичные и квалифицированные менеджеры. Хорошо себя зарекомендовали выпускники группы «Проектный менеджмент и маркетинг аэрокосмической техники» Аэрокосмического факультета. Нам бы хотелось, чтобы будущие выпускники так же хорошо овладели специальностью не только в области аэрокосмической техники, но и в продвижении па рынки продукции двойного и гражданского назначения.

Следует отметить, что Аэрокосмический факультет всегда идёт в ногу со временем. В программе конференции появляются новые направления, например, «Экономика, инновационные технологии», в рамках которой, надеюсь, прозвучат доклады и гражданской направленности.

Инновационная составляющая будет красной нитью проходить и через всю экспозицию ВПК «НПО машиностроения» на международном аэрокосмическом салопе МАКС-2007. Высокий уровень инновационной активности ВПК «НПО машиностроения» в том, что мы первые и единственные выпускаем ракетную технику, способную стартовать и из-под воды, и с земли, и с воздуха, а также ещё и ракетно-космическую технику. Это отражено на флаге нашего предприятия. Более 500 изобретений внедрены в тематические разработки предприятия. Ряд из них открыл целые направления работ, связанных с перечисленными оборонными направлениями.

И в МГТУ имени Н.Э.Баумана, и в НПО машиностроения ведётся большая работа в области создания новых композиционных материалов и в области нанотехнологий. Это созвучие времени, научно-технических интересов и целей создаёт прекрасную основу для дальнейшего развития диверсификационных направлений деятельности и перспективу Вашего участия в их реализации.

Желаю участникам конференции плодотворной работы и успехов в реализации своих научных, технических и инновационных идей!

УДК 378.(091)

И.Б. Фёдоров, Р.П. Симоньянц

20-ЛЕТНИЙ ОПЫТ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПОТЕНЦИАЛА СТУДЕНТОВ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА

Историю Аэрокосмического факультета можно отсчитывать с момента выхода приказа о его создании. Приказ был подписан двумя министрами СССР – министра Общего машиностроения и министра Высшего образования – двадцать лет назад, 6 июня 1987 года. С того времени главный вектор совместных усилий коллективов университета и предприятия «НПО машиностроения» имел неизменную ориентацию. Её определяет плодотворная идея: *к высокому уровню инженерного образования – через реальную науку, через проектную и исследовательскую работу студентов в высокопрофессиональной среде разработчиков наукоёмких технологий*.

И сегодня, 20 лет спустя, реализуя разработанную здесь высокоэффективную технологию подготовки инженерных кадров, хорошо адаптированных к реальным условиям проектно-исследовательской деятельности на предприятии наукоёмкой отрасли, мы убеждаемся в правильности выбранного нами направления. Несмотря на чрезвычайные трудности, встретившиеся на нашем пути в этот сложный исторический период, нам удалось не только выжить, выстоять, но и развиться так, что сейчас можем с гордостью оценивать высокие достижения в своей работе.

За это время совместными усилиями университета и предприятия подготовлено 690 дипломированных инженеров. После окончания обучения остались в НПО машиностроения и работали разное время около 280 выпускников. Из них 130 успешно трудятся в творческих коллективах подразделений предприятия и в настоящее время.

Руководители и специалисты НПО многократно убеждались в высоком интеллектуальном уровне выпускников и студентов факультета, в их отличной подготовке как в области фундаментальных и общеинженерных дисциплин, так и по специальности. Не случайно более 35 выпускников факультета вошли в руководящее звено предприятия, занимая ключевые посты – начальников секторов, научно-исследовательских лабораторий и отделов, руководителей крупных проектных отделений, комплексов, дирекций, в том числе и должность заместителя Генерального директора.

Можно назвать много важных проектно-исследовательских работ предприятия, которые были успешно выполнены благодаря активному участию студентов Аэрокосмического факультета. Специалисты высоко ценят интеллектуальный уровень наших студентов, высокую практическую и теоретическую значимость их труда на предприятии. Убедительным подтверждением этих слов могут служить блестящие защиты диссертаций недавних выпускников факультета.

Галерея защитивших кандидатские диссертации выпускников АКФ в последние годы стала быстро пополняться: Асатуров Сергей, Белоусов Иван, Дерезовский Дмитрий, Колготин Алексей, Забарко Дмитрий, Зайцев Сергей, Сысенко Валентина и Денис, Чемякин Эдуард. Немало ещё диссертационных работ выпускников факультета уже подготовлено к защите. А ведь совсем недавно все они, будучи студентами, выступали с научными докладами на наших традиционных научно-технических конференциях «Аэрокосмические технологии» вместе со своими руководителями от предприятия и от университета.

Важный аспект совместной подготовки специалистов на базовом предприятии – возможность целевого формирования творческих коллективов студентов в соответствии с планами перспективных разработок. Одной из наиболее рациональных форм такой работы является создание на факультете студенческих исследовательских лабораторий (КБ), выполняющих актуальные для предприятия задания.

Фактически такая студенческая лаборатория на Аэрокосмическом факультете уже функционирует. Её деятельность направлена на коллективное выполнение студентами факультета под руководством преподавателей университета и специалистов НПО машиностроения актуальных для предприятия задач. В этой работе основное участие принимают студенты 5 - 6 курсов. Тематика предложенных специалистами НПО работ охватывает, прежде всего, круг вопросов, связанных с разработкой на предприятии ракетной и космической техники.

Практически весь Аэрокосмический факультет можно считать совместной творческой лабораторией университета и предприятия, в которой не только готовятся отличные, хорошо адаптированные к научной и проектной работе на предприятии инженерные кадры, но и создаются ценные для предприятия продукты интеллектуальной деятельности. В 2004 году, например, этап коллективной работы студентов факультета был завершен серией успешных защит глубоко проработанных дипломных проектов по нескольким актуальным направлениям практической деятельности предприятия.

Наиболее активные разработчики коллективных студенческих проектов по реальной тематике предприятия увлеченно и с большой

отдачей и в настоящее время, уже после защиты дипломов, продолжают свою творческую деятельность в тех же подразделениях. Одна из выполненных студентами работ представлялась на авиакосмическом салоне МАКС-2005 (16-21.08.2005 года), где была удостоена Почетной грамоты. Очередной этап работы студенты представили на защитах ряда курсовых и дипломных проектов летом 2006 и 2007 года. Предприятию переданы материалы разработок, в которые были вложены богатый опыт и солидный багаж уникальных знаний преподавателей университета и специалистов предприятия и, что важнее всего, огромный интеллектуальный потенциал студентов, усиленный энергией их молодости и романтическим стремлением к творчеству.

Следует отметить, что та творческая атмосфера, которая создана на факультете, обеспечивает самые благоприятные условия для успешной образовательной деятельности. Качество учебного процесса, качество знаний студентов Аэрокосмического факультета – на самом высоком уровне. Многие годы здесь после окончания «хвостовой» сессии нет отстающих. Рекордный процент дипломов с отличием (до 25%) – на АКФ. Рекордное число именных стипендиатов Президента РФ и именных стипендиатов Правительства РФ – на Аэрокосмическом факультете. Это очень хорошие, образцовые показатели.

Высокий уровень подготовки и высокий интеллектуальный потенциал студентов факультета АК получил и международное признание. Прекрасные отзывы о факультете и о базовом предприятии, НПО машиностроении, дали французские студенты, проходившие здесь стажировку в 2001 – 2002 годы. Прекрасно себя зарекомендовали студенты факультета на стажировке в Центральной Европе, в Люблянском университете Словении (2005 г.). В этом учебном году по просьбе Люблянского университета ректорат МГТУ им. Н.Э. Баумана направил в Словению на годичную научную стажировку трёх наших студентов. В числе персонально приглашенных на эту научную стажировку – два студента Аэрокосмического факультета.

Резюмируя, подчеркнём, что многолетний опыт сотрудничества НПО машиностроения и МГТУ им. Н.Э.Баумана убедительно доказывает, что при рациональном управлении процессом взаимодействия преподавателей университета и специалистов предприятия использование интеллектуального потенциала студентов в профессиональной проектно-исследовательской деятельности предприятия даёт прекрасные результаты. Наша задача – сложные механизмы этого взаимодействия совершенствовать и дальше.

УДК 378

Ю.И. Минаев, М.А. Хомяков, Е.Г. Куранов, Л.С. Точилов

СВОИХ СПЕЦИАЛИСТОВ ПРЕДПРИЯТИЕ СОВМЕСТНО С МГТУ ГОТОВИТ У СЕБЯ

Научно-технические конференции, которые традиционно проводит Аэрокосмический факультет в НПО машиностроения, являются своеобразным научным полигоном, на котором развиваются и оттачиваются новые идеи, новые подходы. Они позволяют сверять формирующиеся научные взгляды и концепции с потребностями общества, служат базой для создания прорывных технологий. Такая сверка особенно важна в области аэрокосмических систем, где приходится решать сложные задачи увязки часто весьма противоречивых проблем. А роль этих конференций в вопросах подготовки и развития штата высококвалифицированных специалистов для любой организации, работающей в сфере высоких технологий, трудно переоценить.

О ценности инженерных кадров в ОАО «ВПК «НПО машиностроения» знают очень хорошо. И поддержку молодым специалистам оказывают не на словах, а на деле. Большинство своих будущих конструкторов и испытателей предприятие совместно с МГТУ им. Н.Э. Баумана растит у себя со студенческой скамьи. Есть ли лучший способ приобрести грамотного, квалифицированного специалиста?

Ежегодно в ЦКБМ работают по совместительству, проходят практику и стажировку более ста студентов. В основном – с Аэрокосмического факультета (АКФ) МГТУ им. Н.Э. Баумана. Конечно, есть и студенты других факультетов МГТУ, а также МАИ, МЭИ и других вузов. Собственно, для студентов АКФ само понятие «практика» имеет особый смысл. В подразделения студенты-совместители приходят работать в свободное от аудиторных занятий время. Работа по специальности в профессиональном коллективе над решением реальных проблем проектирования и создания систем и конструкций ракетно-космической техники – лучше любой учебной практики.

Работают студенты обычно на старших курсах. По существующей на АКФ программе обучения обязательная стажировка в подразделениях предприятия, одной из форм которой является работа по совместительству, начинается с 4-го курса. Студентам же младших курсов работа не обязательна, но те из них, кто готов узнать, что такое

инженерный труд, приходят и раньше. Есть студенты, которые начинают трудиться даже на первом курсе.

Как правило, такие люди работают на предприятии все 6 лет учебы и потом остаются на постоянную работу. Потому что это – целеустремленные люди, которые знают, чего хотят и зачем они сюда пришли. Если, например, первокурсник решил поработать, он может прийти в деканат, объяснить, какое именно направление деятельности его интересует. Декан АКФ Ростислав Петрович Симоньянц с удовольствием проконсультирует его и направит к руководителю подразделения, которое занимается тем, что интересно студенту.

Иногда, правда, приходится направлять не столько по желаниям студентов, сколько по потребностям предприятия. В любом случае руководство ЦКБМ ориентируется на специализацию студента. Для студентов младших курсов это прекрасная возможность либо убедиться в правильности сделанного выбора, либо скорректировать его, пока еще можно поменять специализацию.

Начиная с 1 курса, ведущие специалисты предприятия проводят со студентами ознакомительные лекции-беседы о предприятии, о его подразделениях и направлениях их работы, о задачах, решаемых при создании изделий, об особенностях работы систем и т.д. Организуются производственные экскурсии на стендовую базу, в испытательные лаборатории, в теоретические и конструкторские подразделения. Все это позволяет студентам осознано выбрать направление будущей деятельности, и даже подразделение, в котором им хотелось бы работать.

С 4 курса начинается официальная обязательная стажировка студентов на предприятии. Они сдают зачеты по ННЛП (непрерывной научно-производственной практике). На этом этапе оценка их работы со стороны руководителей подразделений становится официальной. В деканат регулярно предоставляются отчеты о проделанной студентом работе, а также отзывы руководителя отдела, где он работает. Итоговые оценки по ННПП ставит комиссия, в состав которой входят как руководители по направлениям ЦКБМ, так и представители факультета. Поэтому комиссия обладает всей полнотой информации об успехах молодого человека и в учебе, и на трудовом поприще.

Для инициативных, проявивших себя в работе, студентов на предприятии учреждена стипендия Генерального конструктора. Список претендентов на ее получение формирует специальная комиссия, состоящая из представителей Аэрокосмического факультета и сотрудников НПО машиностроения. Главным критерием отбора является вклад кандидата в рабочий процесс. И, надо сказать, что, хотя не все стипендиаты круглые отличники, двоечников и троечников среди них

нет. Это лишний раз свидетельствует о том, что без надежной теоретической подготовки невозможна качественная практическая работа. К счастью для предприятия, на уровень базовой подготовки студентов жаловаться не приходится.

Следующий очень важный вопрос: сколько же выпускников остается работать на предприятии? По оценкам кадровой службы – порядка 30-40%. Бывают годы, когда эта цифра доходит и до 50%. Говорят, мы в этом смысле избалованы, поскольку считаем, что это небольшой процент. Но, судя по статистике, существующей на подобных факультетах и филиалах при других предприятиях отрасли, в среднем на базовой фирме остается работать всего 5-10% выпускников. Так что у нас очень хорошие показатели, хотя и хотелось бы выше.

Успехов и карьерного роста среди выпускников АКФ добились очень многие. Можно сходу назвать не менее 40 имён, показавших себя отличными специалистами и ставших руководителями разного уровня. Конечно, это люди разных лет выпуска. А если посмотреть более внимательно, назвать всех, кто достоин чести называться хорошим специалистом и ценным работником, то список вырастет не менее чем в два раза. Но говорить только о карьерном росте было бы несправедливо. Ведь успешно двигаться можно не только в этом направлении. Многие заняли на предприятии должности ведущих специалистов, некоторые защитили диссертации. Не всем дано и не всем хочется руководить. Важно, что эти люди приносят очень большую пользу как специалисты. Они пользуются большим авторитетом среди коллег.

Нельзя забывать и о том, что молодые специалисты приходят к нам не только с АКФ. Есть еще несколько базовых вузов, чьи выпускники не менее достойны и внимания, и похвалы. Но те, кто работал у нас в студенческие годы, к моменту выпуска уже являются готовыми специалистами. Это очень важно. Ведь известно, что на «доводку» молодого специалиста после вуза затрачивается три – четыре года. А тем, у кого такой возможности не было, в подразделениях, где они работают, стараются помочь как можно быстрее войти в курс дела. Важно, что эти молодые специалисты в творческой среде более подготовленных молодых своих коллег стремятся поднять свой профессиональный уровень, получать новые знания и навыки.

Грамотные, хорошо подготовленные сотрудники – гарантия развития предприятия. Судя по качественному составу молодого пополнения инженерных и научных кадров, в будущем у НПО машиностроения будет еще много новых разработок, достойных славной истории предприятия.

УДК 378:629

О.Н. Тушев

НАУЧНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ КАФЕДРЫ, ОСНОВАННОЙ АКАДЕМИКОМ В.Н. ЧЕЛОМЕЕМ

Кафедра СМ-2 «Аэрокосмические системы» на Аэрокосмическом факультете осуществляет подготовку двух студенческих групп. Основные научные направления кафедры определил ещё в 60-ых годах её основатель и первый заведующий, академик В.Н. Челомей. Они отражали научные интересы и привязанности Владимира Николаевича. Среди них, в первую очередь, были проблемы динамики конструкций и параметрических колебаний.

В настоящее время стратегическая направленность научной деятельности на кафедре сохранилась: динамика систем и конструкций. Научную тематику работ определяют, прежде всего, специальности по которым осуществляется подготовка инженеров: космические аппараты и разгонные блоки; ракетостроение. Большая часть научных работ кафедры ориентируется на разработки НПО машиностроения. Тематика работ охватывает круг классических вопросов. Проблема старая, в ней много что уже сделано. Однако сотрудникам кафедры удалось и в ней найти ряд интересных решений. Например, разработаны оригинальные методы численного расчета динамики упругих конструкций. Удалось решить ряд проблемных задач динамики при действии ударных нагрузок. В настоящее время удалось получить хорошие результаты в решении таких задач, для которых ряды по собственным формам или не сходятся, или сходятся, но очень плохо.

Долгое время на кафедре работал профессор Л.С.Шаповалов. Его здесь многие хорошо знают. С его именем связан целый этап в жизни кафедры. Пришел он к нам из НПО машиностроения уже сложившимся ученым. Им было основано научное направление, связанное с расчетом динамики и прочности конструкций из композиционных материалов. В настоящее время это направление сохраняет свою актуальность и развивается.

Интересное направление работ связано с исследованием неконсервативных систем, решением задач аэроупругости. К ним относятся, например, всем известные проблемы флаттера и дивергенции. Разработаны теоретические основы и численные методы решения задач колебаний летательных аппаратов в условиях неконсервативного нагружения.

Ещё одно научное направление кафедры связано с параметрическим анализом, которым сопровождается любе проектирование. С этим направлением связаны проводимые в настоящее время кафедрой совместно с НПО машиностроения исследования. Ими обеспечивается теоретическое сопровождение частотных экспериментов.

Разработанные на кафедре модифицированные методы синтеза форм колебаний для различных компоновочных схем летательных аппаратов дают возможность получать динамические характеристики слоистых составных конструкций на основе исследования простых исходных модулей. Это направление исследований на кафедре в настоящее время получило своё дальнейшее развитие.

Как правило, наши научные изыскания сочетаются с решением конкретных практических задач. Одной из таких задач является защита ракеты при шахтном старте. Впервые задача эта была поставлено В.Н. Челомеем. С тех пор мы ею и занимаемся. Это очень интересная задача, связанная с динамикой и прочностью. На кафедре создана теория построения оптимальной амортизации ракет различных классов и пускового оборудования в стартовых сооружениях, которые подвергаются ударным нагрузкам. При этом учитывается стохастичность, как внешних воздействий, так и свойств самой конструкции. Это направление исследований на кафедре продолжает развиваться.

С космической тематикой на кафедре связано направление работ по стабилизации космических летательных аппаратов. Известно, что это – сложная нелинейная задача динамики. Опять-таки, и это направление возникло в связи с потребностями НПО машиностроения. На сегодняшней конференции будет представлена одна из работ этого направления.

Новым научным направлением на кафедре стали задачи аэрогидроупругости. Они возникли при решении проблемы старта ракеты из-под воды в условиях вихревого обтекания. Работа эта приближается к защите докторской диссертации. Сегодня на конференции с этой работой можно будет познакомиться (доклад Г.А. Щеглова).

Ко всем своим научным разработкам кафедра широко привлекает студентов. Две аспирантские работы, выполненные работающими в НПО машиностроения выпускниками Аэрокосмического факультета, уже подготовлены к защите. Ранее они уже представлялись на наших научно-технических конференциях. На сегодняшней конференции также будет представлен ряд работ наших студентов, аспирантов и их научных руководителей.

ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 378

И.Б. Федоров

ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ МГТУ ИМ. Н.Э. БАУМАНА В ОБЛАСТИ НАУЧНЫХ ИННОВАЦИЙ

Показано, что главным тормозом инновационного развития высокотехнологичных отраслей экономики России является отсутствие законодательной поддержки. Дана оценка состояния работ по шести инновационным проектам в рамках Приоритетного национального проекта «Образование».

1. Проблема развития высокотехнологичных отраслей – отсутствие законодательной поддержки. Рост экономики за счет инноваций во всем мире составляет примерно 60%, а в России – только 8%. Переход от сырьевой экономики на инновационный путь развития для России вопрос принципиальный. Без инновационной экономики не решить насущных проблем страны. Но одних призывов мало. Сегодня в нашей стране проблема развития высокотехнологичных отраслей и вывода наукоемкой продукции на рынок волнует и ученых, и бизнес, и правительство.

Главным тормозом инновационного развития страны является отсутствие должной законодательной поддержки. Известно, что в странах с высоким уровнем инновационной активности законодательство помогает в первую очередь развитию высокотехнологичных отраслей. Особенно если речь идет об использовании интеллектуальной собственности государственными учреждениями, в частности государственными вузами. Сегодня во многих ведущих странах мира законодательство, связанное с развитием интеллектуальной собственности, постоянно совершенствуется. В нашей стране ситуация сейчас иная.

Ограничение прав. Государственные образовательные учреждения не имеют возможности самостоятельно распоряжаться созданными результатами интеллектуальной деятельности. Кроме того, они не могут самостоятельно заключать лицензионные соглашения по введению в хозяйственный оборот объектов интеллектуальной собственности и уступать права на них третьим лицам. Соответственно, практически невозможно ведение, переговоров с потенциальными инвесто-

рами в качестве полноправного партнера по созданию и доведению результатов научно-технической деятельности до конечного продукта.

По сути, неспособность государственных образовательных учреждений самостоятельно распоряжаться объектами интеллектуальной собственности «толкает» научных сотрудников вузов скрывать разработки, имеющие коммерческий потенциал, получать правоустанавливающие документы на свое имя и лично заключать лицензионные соглашения, самостоятельно учреждать коммерческие инновационные предприятия. Авторы научно-технических разработок экономически почти не мотивированы оформлять патенты на имя государственного учреждения. Все это, безусловно, отразилось на количестве патентов и свидетельств в вузах. Например, до 1990-х годов прошлого века МГТУ им. Н.Э.Баумана получал сотни авторских свидетельств за год, теперь же активность в этой области упала до 40–50 патентов и свидетельств в год. Эти же законодательные ограничения сдерживают организацию в вузах полноправных центров трансферта технологий, взаимодействующих с инвесторами, в том числе зарубежными.

Сравнение с зарубежным опытом. В Германии похожая проблема была решена в 2003 году, когда государственным университетам разрешили самостоятельно заключать лицензионные соглашения. В итоге сегодня эта страна занимает первое место в Европе и третье место в мире (после США и Японии) по количеству запатентованных разработок.

А каково положение дел для решения этой проблемы в нашей стране? В 2005 году Правительство РФ приняло Постановление № 685 «О порядке распоряжения правами на результаты научно-технической деятельности». В соответствии с пунктом 8 данного положения, «права на результаты научно-технической деятельности, получаемые в федеральных государственных учреждениях, закрепляются за указанными учреждениями. Условия распоряжения этими правами определяются договором, заключаемым главным распорядителем или распорядителем бюджетных средств с федеральным государственным учреждением». Форма типового договора должна утверждаться правительством. Однако такой договор до сих пор, к сожалению, отсутствует.

Также, в соответствии со статьей 123 ФЗ «О Федеральном бюджете на 2006 год», средства, полученные от предпринимательской и иной приносящей доход деятельности, не могут направляться федеральными государственными учреждениями на создание других организаций и покупку ценных бумаг. Это ограничение существенно усложняет участие государственных учреждений в инновационных про-

цессах, так как запрещает им образование других организаций, в том числе инновационных, в сфере малого и среднего бизнеса.

Вновь обратившись к зарубежному опыту, можем видеть, что такие ограничения не оправданы. Например, Гамбургский технологический университет учредил коммерческую инновационную компанию TuTeck Innovation, главной задачей которой стало установление связей вузов с субъектами экономики. Сфера деятельности компании – непрофильные для государственного образовательного учреждения процедуры: управление техническими проектами вплоть до их внедрения в производство, маркетинговые исследования рынка, юридическое и экономическое сопровождение инновационной деятельности и другие. Годовой доход TuTeck Innovation за 2006 год составил свыше 15 мил. евро. Следовательно, мировой опыт показывает, что государственные вузы вполне могут иметь возможность участвовать в создании коммерческих юридических лиц.

Без ущемления интересов государства как учредителя государственных вузов, несущего дополнительную ответственность по долгам таких учреждений, следовало бы предоставить им некоторые возможности по созданию коммерческих юридических лиц. Интересы государства при этом могут быть защищены жесткими правилами. Главное, что необходимо сделать для более полного участия вузов в инновационных процессах: Дать вузам право распоряжаться принадлежащей им интеллектуальной собственностью. Предоставить возможность учреждать малые предприятия. И, главное, увязать все это с Налоговым и Бюджетным кодексами.

2. Инновационные проекты МГТУ им. Н.Э.Баумана. В 2006 году наш университет стал победителем конкурса инновационных программ вузов в рамках Приоритетного национального проекта «Образование». Четыре проекта из шести базируются на инновациях в науке, которые потом становятся основой для инновационных образовательных программ.

Первый проект – «Оценка остаточного ресурса сложных изделий». Мы разрабатываем новые способы этой оценки. Например, определяем, в каком состоянии находится нефтяной или газовый трубопровод, можно ли и дальше спокойно его эксплуатировать или уже пора ремонтировать. Разработан специальный прибор - ультразвуковой дефектоскоп. Это робот с магнитными колесами и с ультразвуковым томографом. Перемещаясь по трубе, он снимает полную картину ее состояния, со всеми дефектами. Томограф не только обнаруживает нарушения целостности труб – раковины, трещины, но и определяет, как

эти дефекты будут развиваться, чем грозят при дальнейшей эксплуатации трубопровода.

Эта довольно сложная техника внедрена в Газпроме. Для ее освоения буквально по всей России созданы эксплуатационные пункты. Специалисты оттуда приезжают к нам на обучающие семинары и потом уже у себя на местах монтируют и осваивают новую технику. Эта методика контроля труб признана за рубежом. В частности, Европейским союзом сварки. И используется не только у нас, но и в странах Западной Европы. Патенты наших ученых, легшие в основу этой разработки, получены в разное время. У нас был большой задел. Ультразвуковые дефектоскопы уже выпускаются промышленностью. Пока освоено их серийное производство.

Второй проект – «Нанотехнологии в микросистемотехнике». В ближайшем будущем в МГТУ будет полностью готова и оборудована так называемая чистая комната, под которую выделен целый блок в нашем новом корпусе. Закуплено новейшее оборудование – как инженерное, так и испытательное. Воздух, прежде чем попасть внутрь этой лаборатории, будет проходить тщательную очистку. Работать там можно будет только в спецодежде.

Такая «чистая комната» просто необходима для проведения работ, связанных с использованием нанотехнологий в микросистемотехнике и электронике, для создания порошков, покрытий и т.д. Этот проект мы выполняем совместно с РНЦ «Курчатовский институт». Одна из наших разработок – миниатюрный робот, размером меньше булавочной головки, который может передвигаться по кровеносным сосудам, чтобы почистить их от холестерина или доставить лекарство в нужное место... Как и в первом проекте, уже есть методические материалы, организовано обучение работников клиник.

Третий проект – создание центра радиофизики и технологий миллиметрового диапазона радиоволн и коротковолновой части этого диапазона – 1…3 мм. Надо заметить, что развитие радиотехники движется сейчас как раз в этом направлении – в сторону миллиметровых волн. Все остальное уже более-менее освоено, а тут есть еще много белых пятен. «Сердце» нашего центра радиофизики – уникальный радиотелескоп, единственный в России. Он служит для изучения радиофизических свойств атмосферы и спектрального состава межзвездного газа, позволяет определять температуры солнечной поверхности, то есть прогнозировать состояние Солнца, возможные вспышки на нем. Эта информация направляется в Институт Штейнберга для составления прогнозов состояния Солнца.

Радиотелескоп находится за городом, в нашем загородном экспериментальном центре. Антенны – два огромных зеркала на вращающихся основаниях, каждое 7,5 метра в диаметре. Чтобы они могли работать в миллиметровом диапазоне, нужна исключительная точность «выдерживания» поверхности: допускается отклонение от параболы не больше, чем одна десятая доля миллиметра на 7,5 метра! И это при учете всех возможных изменений нагрузок – гравитационных, тепловых, ветровых... Телескоп будет использоваться и в радиолокационном режиме, то есть в режиме активного зондирования. Для этого на нем установлен передатчик. Будем изучать возможности наблюдения в этом диапазоне за космическими объектами. Закуплены и сейчас отлаживаются новые спектрометры, устройства управления антеннами радиотелескопа.

И робот по изучению состояния трубопроводов, и микросистемотехника, и телескоп - все это разработки мирового уровня. Многие из них - единственные в России.

Следующий проект – создание медицинской техники, действие которой основано на новых физических принципах. В частности, это медицинские приборы с использованием лазерного излучения, ультразвука, плазмы. Совместно с Первой Градской больницей мы создали учебно-методический медико-технологический центр, где все эти устройства – кардиографы, хирургический инструмент, различные диагностические приборы – разрабатываются и испытываются.

И так же, как и в других проектах, большое внимание уделяется обучению пользования этой новейшей аппаратурой. Проводятся семинары и для студентов нашего факультета биомедицинской техники, и для медиков, работающих в больнице и обслуживающих эту технику. Это инженеры. Современная клиника сейчас имеет, наверное, больше инженеров, чем врачей. Но новая медицинская техника отличается от традиционной. Скажем, плазменный резак, на который получено множество авторских свидетельств, действует по тем же принципам, что и ракетный двигатель. Позволяет уменьшить кровотечение при сложных операциях. Особенно онкологических. Ведь плазма - хороший коагулятор, она способствует «завариванию» кровеносных сосудов.

Два проекта посвящены разработке новых информационных технологий, и результаты их используются во всех остальных подразделах нашей программы. Например, разрабатывается новая технология создания электронных учебников... Учитывая, что у нас в университете много уникальных стендов, порой единственных в стране, мы большое внимание уделяем так называемым лабораториям удаленного

доступа, которые могут работать в интерактивном режиме. Возможности Интернета позволяют не только издалека наблюдать за ходом эксперимента, но и управлять им. Такая лаборатория уже появилась в этом году при радиотелескопе, создается в рамках проекта «Нанотехнологии в микросистемотехнике». Разрабатываем методические материалы, проводим семинары для студентов, преподавателей, сотрудников других вузов. Всего этим новым технологиям за год мы обучим порядка 900 человек. Надеемся, что, познакомившись с лабораториями удаленного доступа, люди будут стараться делать что-то подобное и в своих вузах. Это лучшее, что можно придумать. Ведь не каждому университету по средствам приобретение дорогого уникального оборудования. А с помощью такой лаборатории можно участвовать в эксперименте так, как будто она есть у вас.

Шестой проект – «Менеджмент высоких технологий» [1]. Года три назад у нас была лицензирована и открыта специальность под таким же названием. Сейчас идет наращивание учебных программ – по мере того как студенты переходят с курса на курс. Учебные планы составлены таким образом, чтобы студенты получали как инженерные навыки, так и знания менеджмента и маркетинга. Ведь беда в том, что сегодня многие называют себя менеджерами, но, чем управляют, сами не знают. Мы готовим предметно-ориентированных менеджеров. Они получают хорошие инженерные познания, фундаментальное знание математики – словом, все для того, чтобы работать в области высоких технологий. Такие специалисты со знанием дела могут оценить качества, достоинства, преимущества того или иного прибора или устройства – и правильно построить весь жизненный цикл этого изделия, включая продажу. Предметно-ориентированные менеджеры сегодня остро требуются многим фирмам оборонного комплекса.

3. Заключение. Основное достижение МГТУ имени Н.Э. Баумана, прежде всего в том, что научные инновации, которыми наш университет всегда славился, стали гораздо шире использоваться и на практике, и в образовательных программах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Омельченко И.Н. Подготовка в МГТУ им. Н.Э. Баумана специалистов инновационного менеджмента в сфере высоких технологий. Настоящий сборник.

УДК 378:338.2

И.Н. Омельченко

ПОДГОТОВКА В МГТУ ИМ. Н.Э. БАУМАНА СПЕЦИАЛИСТОВ ИННОВАЦИОННОГО МЕНЕДЖМЕНТА В СФЕРЕ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Дан анализ деятельности факультета Инженерный бизнес и менеджмент МГТУ им. Н.Э.Баумана по реализации проекта «Предметно-ориентированная подготовка специалистов в области инновационного менеджмента в сфере высоких технологий».

1. Введение. В МГТУ им. Н.Э. Баумана в течение ряда лет разрабатывалась и реализована концепция подготовки инженеров-менеджеров. При этом был использован опыт, накопленный как в России, так и за рубежом. Концепция реализована на созданном в 1993 году факультете «Инженерный бизнес и менеджмент» (ИБМ) [3]. Основная цель его создания: усиление экономической подготовки студентов инженерных факультетов университета, подготовка дипломированных специалистов. Важной особенностью факультета является сочетание фундаментальной университетской инженерной подготовки с не менее фундаментальной подготовкой в области экономики и менеджмента.

Создание факультета связано с возникшей острой потребностью в специалистах, способных глубоко разбираться в предмете инженерного бизнеса (наукоемких продуктах и технологиях), системно анализировать отечественный и зарубежный рынки, комплексно решать вопросы управления производством и организациями различных форм собственности. Потребовались специалисты нового типа, обладающие одновременно теоретическими знаниями и практическими навыками инженера, экономиста и менеджера.

Система подготовки таких специалистов тесно связана с реальным бизнесом и непрерывно совершенствуется. В рамках инновационной программы осуществляется попытка отразить основные положения системы профессиональной подготовки менеджеров в области высоких технологий. Учебные планы периодически совершенствуются. В настоящее время накоплен серьезный опыт по подготовке специалистов в области управления на предприятиях высоких технологий. Это – и аспект промышленного маркетинга, и управление производством, и управление инновациями.

2. Проект: Предметно-ориентированная подготовка специалистов в области инновационного менеджмента в сфере высоких технологий. Проект с таким названием реализуется в числе шести других проектов инновационной образовательной программы «Научное и кадровое обеспечение инновационного развития технических систем, объектов и технологий, отвечающих требованиям мирового уровня к качеству, надежности и безопасности» [1]. В 2006 году МГТУ им. Н.Э. Баумана выиграл конкурс среди вузов на реализацию этой программы.

Целью реализации проекта является развитие системы подготовки специалистов в области предметно-ориентированного инновационного менеджмента по всем стадиям жизненного цикла наукоемкой продукции и формирования совокупности базовых знаний инновационного менеджмента в сфере высоких технологий у студентов инженерных специальностей, а также в рамках второго и последипломного образования.

В настоящее время в стране появилась реальная необходимость в подготовке принципиально новых специалистов-управленцев, способных с одной стороны, глубоко разбираться в объекте высокотехнологичного бизнеса, научно обосновывать и управлять стадиями жизненного цикла наукоемкой продукции, с другой стороны, в полном объеме обладать знаниями и умениями менеджера.

Сфера управления наукоемкими производствами в соответствии с широким распространением CALS-технологии к настоящему времени стала охватывать все стадии жизненного цикла продукции, включая фундаментальные и поисковые исследования, НИОКР, производство, эксплуатацию и экологически обоснованную утилизацию.

Вхождение предприятий в инфраструктуру рыночной экономики требует значительного изменения и развития теории и практики планирования, организации и управления сложными материальными, информационными и финансовыми потоками на промышленных предприятиях и в интегрированных производственно-корпоративных структурах, включая этапы маркетинга, разработки и проектирования наукоемкой продукции, производства, сбыта, сервисного обслуживания в эксплуатации, утилизации. Это обуславливается перемещением основной доли работ по планированию ресурсов предприятия, распределению и сбыту готовой продукции из центральных государственных органов непосредственно на предприятия.

Подготовка специалистов в области организации и управления наукоемкими предприятиями в сфере высоких технологий сочетает в себе полную совокупность инженерных и технологических знаний, умений и навыков со знаниями, умениями и навыками в области ме-

неджмента. Таким образом, специалист получает оптимальный уровень междисциплинарной подготовки.

3. Задачи проекта. Основная инновационная образовательная задача в рамках проекта – подготовка специалистов в области управления деятельностью предприятий, производящих и реализующих наукоемкую и высокотехнологичную продукцию. Областью профессиональной деятельности такого специалиста является управление жизненным циклом наукоемкой продукции, менеджмент качества системы управления высокотехнологичным производством, маркетинг и коммерциализация наукоемкой продукции. Для решения основной инновационной образовательной задачи разработан весь комплекс научно-методического и программного обеспечения процесса обучения для каждой категории специалистов, а именно: для будущих инженеров-менеджеров дневной формы обучения и проходящих обучение в системах второго образования, студентов инженерных специальностей, специалистов, повышающих квалификацию в структурах переподготовки кадров.

Инженер-менеджер, подготовленный по направлению «Организация и управление наукоемкими производствами» – это специалист в области стратегического и оперативного управления совершенствованием и развитием бизнес-процессов в производственно- технологических системах и комплексах. Он обязан владеть методами системного анализа и синтеза, сбора и анализа технико-экономических данных и принятия решений, пространственно-временной оптимизации материальных, информационных и финансовых потоков на всех стадиях жизненного цикла наукоемкой продукции с целью обеспечения организационно-экономической устойчивости предприятия.

Структура подготовки подобных специалистов позволяет им в полной мере применять полученные знания и квалификацию не только на крупных высокотехнологичных предприятиях, но и на предприятиях любых форм собственности малого и среднего бизнеса.

Научную базу подготовки составляют такие дисциплины, как «Техническая механика», «Материаловедение», «Технология машиностроения», «Теория управления сложными системами», «Анализ и синтез сложных организационно-экономических систем», «Организационно-экономическое моделирование», «Инженерная экономика». На основе этих фундаментальных наук формируется специалист по организации и управлению высокотехнологичным производством.

Основные акценты подготовки таких специалистов направлены на получение: – Практических объектно-ориентированных знаний в области высокотехнологичного производства. – Научно-обоснованных

знаний, способствующих развитию аналитических способностей специалистов и их готовности к разработке и принятию самостоятельных управленческих решений. – Знаний и навыков в области информационных технологий. – Методологических знаний, дающих возможность их использования в различных сферах логистико-ориентированной деятельности наукоемкого предприятия. – Научно-практических знаний в области маркетинга, позволяющих специалисту обеспечивать разработку и выпуск высокотехнологичной продукции в соответствии с предпочтениями потребителей.

4. Формы реализации инновационного образовательного проекта. Отличительными особенностями подготовки специалиста в рамках проекта являются: – Инженерно-техническая подготовка, обеспечивающая глубокое знание специфики и особенностей объекта снабженческо-производственно-сбытовой деятельности в области машиностроения и приборостроения. – Подготовка в области современных информационных технологий, включая CALS-технологии, методологию структурного анализа и синтеза интегрированных информационных моделей, проектирование компьютеризированных интегрированных производственных систем. – Эконометрическая и экономико-математическая подготовка, включая организационно-экономическое моделирование, прежде всего моделирование материальных, информационных и финансовых потоков с целью их ресурсно-временной оптимизации.

Обще профессиональная часть инновационной образовательной программы подготовки специалиста по менеджменту высоких технологий предполагает следующее соотношение дисциплин: – инженерно-технические 50%; – экономические 25%; – управленческие 25%.

Для обеспечения перечисленных особенностей современного предметно-ориентированного менеджера в сфере высоких технологий разработаны учебно-методические комплексы (учебники, учебно-методические пособия, учебные планы и программы), в том числе по таким научно-практическим составляющим, как: - Проблемы маркетинга, маркетинговых исследований и коммуникаций. - Оценка инноваций и управление инновационными процессами. - Разработка, оценка и реализация бизнес-планов соответствующих инвестиционных проектов. - Проведение экспертиз (разработка экспертных технологий на основе достижений современной теории и практики экспертных исследований). - Оценка, анализ и управление рисками (коммерческими, финансовыми, экологическими, технологическими, рисками при управлении качеством и т.д.).

Учебно-практическая база подготовки студентов и переподготовки специалистов, преподавателей, научных и педагогических работников реализуется в создаваемом бизнес-инкубаторе с современным инновационно - технологическим центром презентаций реальных наукоемких инновационных проектов.

5. Результаты и продукты, полученные по окончании реализации инновационного образовательного проекта. Созданный Бизнес-инкубатор с постоянно действующим инновационно-технологическим центром презентаций, позволяет решать задачи: - Повышение качества подготовки специалистов. - Обучение научных сотрудников (прежде всего авторов разработок), специалистов научных подразделений и руководителей научных организаций основным положениям и принципам коммерциализации наукоемких технологий, использование научных результатов в качестве инновационного ресурса. - Подготовка персонала предпринимательской сферы для инновационных предприятий. - Подготовка квалифицированных кадров преподавателей и консультантов для образовательных учреждений, специализирующихся на подготовке персонала и консалтингового сопровождения предприятий, осуществляющих инновационную деятельность. - Обучение и повышение квалификации работников федерального и региональных органов исполнительной власти, отвечающих за обеспечение условий для инновационной деятельности коммерциализации наукоемких технологий, формирования и регулирования соответствующих рынков.

Лабораторная база включает учебные компьютерные классы, множительную технику для обеспечения учебного процесса и работы бизнес инкубатора, технику для проведения презентаций с использованием современных методов. В новых лабораторных классах студенты и слушатели имеют возможность формировать навыки решения различных управленческих задач с помощью новейшего прикладного программного обеспечения, закрепляют полученные теоретические знания на практике, участвуя в деловых играх, выполняют расчеты реальных задач и проводят презентации полученных результатов.

Оборудование и программное обеспечение – в распоряжении участников бизнес-инкубатора. Они ими пользуются как непосредственно для реализации своих проектов (проведения маркетингового исследования, подготовки бизнес-планов, поиска финансирования, презентации проектов, анализа и выбора стратегий), так и для обучения и приобретения знаний для дальнейшего успешного ведения бизнеса. Практикующие менеджеры из промышленности проводят мастер классы для студентов и слушателей, в рамках которых решаются сложные предпринимательские и инновационные задачи.

Презентационный выставочный зал бизнес-инкубатора площадью 270 кв.м. введен в действие, что позволяет на современном уровне проводить деловые игры и презентации инновационных проектов, как студентами и аспирантами, так и представителями промышленных предприятий.

Изданы факультетом ИБМ десятки учебников и монографий. Среди них: Экономика инновационной деятельности наукоемких предприятий. Методы обеспечения конкурентности: оценка технико-экономического уровня и конкурентности продукции, нормативное прогнозирование развития производства, основы нормативного проектирования. Ценообразование наукоемкой продукции: виды цен и факторы, влияющие на них, методы ценообразования, некоторые методы определения цены лицензии. Управление нововведениями на высокотехнологичных предприятиях. Управление финансами наукоемких предприятий. Проектирование логистических систем наукоемких производств.

Созданы новые дисциплины для подготовки специалистов: Информационные системы в контроллинге. Контроллинг инновационных и инвестиционных проектов. Сервис и утилизация наукоемкой продукции. Управление научно-техническими нововведениями. Научные парки и бизнес-инкубаторы. Управление инвестициями наукоемких производств. Управление нематериальными активами наукоемких предприятий. Организационное проектирование бизнеса наукоемких предприятий. Технология презентации.

6. Международный опыт. В рамках национального проекта совместно с коллегами из английского университета ДеМонфорт (г. Лестер) была разработана *новая программа подготовки* магистров по направлению «Менеджмент» - «Предпринимательство и инновационная деятельность в области высоких технологий». Уникальной особенностью учебного курса является сочетание современных подходов управления предприятием в сфере высоких технологий и методов креативного предпринимательства.

Факультет «Инженерный бизнес и менеджмент» совершенствует технологию организации и проведения деловых игр для подготовки специалистов в области управления наукоемким производством. Совместно с Университетом Мосбах (Германия) на факультете ИБМ МГТУ им. Н.Э.Баумана организована *международная деловая игра* «International Sales Case Competition». В мероприятии приняли участие студенты из Германии, Франции, России. В процессе игры студенты получили возможность развить практические навыки менеджмента и

логистики применительно к рынку продукции промышленного назначения. Деловая игра проводилась на английском языке.

Известно, что безусловным достоинством такой формы обучения студентов, как «деловые игры», является возможность закрепления ранее полученных базовых знаний, касающихся основных принципов и закономерностей развития фирмы (управление рисками; проектный анализ; предприятие в инновационной среде; конкурентная политика на товарных рынках и др.) Огромная популярность среди студентов деловых игр, отвечающих мировым стандартам, стала основой для развития этой формы обучения на факультете бизнес и менеджмент» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Совместно с «Университетом прикладных наук» (Германия) для студентов факультета ИБМ организована деловая игра «Business Simulation ABC», входе которой студенты получили возможность вырабатывать и принимать оперативные и стратегические решения в рыночных условиях.

Расширяется контингент обучающихся в области менеджмента высоких технологий. С целью формирования инновационного предпринимательского мышления у слушателей, имеющих высшее образование, на факультете ИБМ создана *бизнес-школа* (БШ). Основным направлением деятельности БШ является разработка и реализация специальных двухлетних программ, профессиональной переподготовки (продолжительность обучения не менее 1000 аудиторных часов), соответствующего требованиям к программам МВД (Мастер делового администрирования) по общему менеджменту, финансовому менеджменту, маркетингу и другим специализациям;

Дополнительными направлениями деятельности являются программы переподготовки и повышения квалификации по маркетингу, бухгалтерскому учету и другим специализациям для лиц, имеющих как высшее профессиональное, так и среднее профессиональное образование: - Интенсивная подготовка специалистов в указанных областях в рамках среднесрочных программ обучения (продолжительность обучения от 500 аудиторных часов), завершающаяся выдачей диплома о переподготовке государственного образца. - Разработка и реализации программ повышения квалификации (продолжительность от 100 до 500 часов), завершающихся выдачей свидетельства о повышении квалификации государственного образца. - Разработка и реализация программ краткосрочного обучения, предназначенных для повышения квалификации руководящего состава фирм, включая повышение квалификации высшего менеджмента до 100 аудиторных часов, завершающихся выдачей сертификата или удостоверения о повышении квалификации государственного образца. - Разработка и проведение целе-

вых (на договорной основе с фирмами) индивидуализированных программ для обучения специалистов в областях, в которых БШ ведет свои программы переподготовки и бизнес-семинары. - Организация и проведение совместных программ обучения, учебных курсов, семинаров с зарубежными школами бизнеса, учебными центрами и иными структурами, занятыми практической и учебно-консультационной деятельностью. - Организация и проведение на регулярной основе обучения и стажировок за рубежом в ведущих учебно-консультационных центрах и школах бизнеса.

12-26 ноября 2006 года группа преподавателей факультета ИБМ прошла стажировку в Немецкой Академии менеджмента Нижней Саксонии (город Целле, земля Нижняя Саксония, Германия) по проекту «Предметно-ориентированная подготовка специалистов в области инновационного менеджмента в сфере высоких технологий» [2]. Знания, полученные преподавателями на стажировке, позволяют проводить поиск возможностей реализации объединения преподавательской и научной работы.

Знакомство с процессом продвижения инноваций в Германии помогло разрабатывать и внедрять методы продвижения инноваций, разработанных в МГТУ имени Н.Э.Баумана и других университетах и НИИ, для использования в народном хозяйстве России, позволило осуществить разработку системы подготовки и переподготовки специалистов в области организации и управления наукоемким производством. В результате стажировки осуществлена подготовка для создания методологической базы создания бизнес-инкубатора.

7. Выводы. Результаты реализации инновационного образовательного проекта должны обеспечить кардинальное решение проблемы подготовки кадров, как для предприятий оборонно-промышленного комплекса РФ, так и для всех наукоемких предприятий промышленности, повысить эффективность управления разработкой, внедрением и реализацией наукоемких инновационно-инвестиционных проектов.

Научные разработки, положенные в основу проектов инновационной образовательной программы, позволяют получить принципиально новые решения многих актуальных научно-технических проблем, связанных с повышением качества, надежности, безопасности технических систем объектов и технологий, отвечающих требованиям мирового уровня. Содействие в создании фирм, в том числе малого и среднего бизнеса, реализующих инновации в науке и технике, позволяют развивать инновационную инфраструктуру города, создавать новые рабочие места, улучшать экономику региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров И.Б Деятельность МГТУ им. Н.Э. Баумана в области научных инноваций. Настоящий сборник.
2. АкоповВ.С., Малинин В.Л. Инновационная инфраструктура ФРГ. Настоящий сборник.
3. Факультет ИБМ МГТУ им. Н.Э.Баумана www.ibm.bmstu.ru/projects.htm

Прения по докладу И.Н. Омельченко

В.А. Бунак. Вопрос к Ирине Николаевне: Как Вы сами оцениваете уровень подготовки на Вашем факультете по основным специальностям и по второму образованию? В чем проблемы?

И.Н.Омельченко: По специальностям факультета «Инженерный бизнес и менеджмент» первые три года дается полноценная инженерная подготовка: математика, физика, теоретическая механика, сопромат. Она дается в несколько облегченном виде. Некоторые студенты думают, что инженерная подготовка – это лишнее. Но выпускники говорят: это необходимо! К сожалению, уровень инженерных знаний у наших студентов сейчас ниже, чем был раньше: катастрофически мало преподавателей среднего «сильного возраста», которые могли бы студентам качественно передать накопленный опыт и знания. Еще держимся за счет тех преподавателей, которые сами окончили МГТУ им. Н.Э.Баумана и стараются преподавать так, как учили их. Но эта прослойка начинает истощаться. Пройдет еще немного времени, и мы столкнемся с проблемой отсутствия этой прослойки. А «пришлые» преподаватели (из других вузов) у нас плохо задерживаются: они не выдерживают ни нашей нагрузки, ни интеллекта наших студентов.

В рамках второго образования мы ведем подготовку по специальностям «Менеджмент организации» и «Экономическое управление на предприятии». Много идет к нам студентов с инженерных факультетов. Треугольник: «инженер – экономист – менеджер» дает хорошую стабильность на сегодняшнем рынке. На 2-ом образовании студентов почти 400 человек. Для человека, получившего хорошую инженерную подготовку, та оболочка, которую дает ему вторая специальность, необходима. Он должен вырваться из стереотипов нашего мышления периода до 90-ых годов, когда был госбюджет, и была стабильность. Теперь этого нет. Они, инженеры, программисты, расчетчики, это должны четко понимать: теперь за все платят. В этой плоскости случаются даже конфликты поколений.

Программа NBM идет в МГТУ им. Н.Э. Баумана по трем направлениям: общий менеджмент; маркетинг и финансы. Очень неплохая программа. Мы её запустили первый год. На сегодняшний день

учатся 8 человек. Это неплохой показатель. В большинстве – это выпускники МГТУ (5 чел.). Слушателям нравится. Нравится то, что преподают ведущие преподаватели нашего университета.

В.А. Бунак: NBM – это дополнительное образование?

И.Н.Омельченко: Да. Слушатели – это специалисты, которые проработали не менее 2-х лет на производстве. Они получают знания по тем предметам и в той области, на что они пришли учиться. Стоимость 8,5 тыс. $ за 2 года. Это – средний уровень, нужно уже повышать. Не нравится нам лишь то, что в группе люди с разным базовым образованием: МГТУ, Консерватория, МФТИ…

А.И.Яковлев: Хочу заметить, что в Высшей школе экономики готовят менеджеров. Студент рассуждает: зачем нас инженерной практике учить? Мы же будем руководить. Если нужно, например, решить задачу программирования – мы наймем программиста, и он это сделает. Это – поверхностный взгляд. А вот реальная жизнь: когда NBM устраивает семинары в сфере информационных технологий, так там, в числе участников, 80% – выпускники МГТУ.

А.Рабочий: Первые три года – это фундаментальная подготовка: физика, математика и др. Узкая специализация начинается с четвертого курса. В связи с этим на предприятии идет разговор о необходимости повышать уровень менеджеров. Возникает вопрос: повышать надо квалификацию инженера до уровня менеджера или квалификацию менеджера до уровня инженера?

И.Н. Омельченко: Инженера до уровня менеджера поднять просто. Но менеджера до уровня инженера вы не поднимите никогда.

Л.С. Точилов: Вопрос масштаба: Менеджер малого предприятия и крупной фирмы, чем они отличаются.

И.Н. Омельченко: Специалиста для крупной фирмы мы называем не менеджером, а инженером-менеджером. Во-первых, настоящий Менеджер – на 95% это дар Божий. Во-вторых, сначала они приходят, например, на уровень мастера технического снабжения.

Садовников В.С.: Реплика к проблеме отечественного опыта в области проектного менеджмента, которую Вы отмечали. Эта проблема не только отдельного предприятия, а проблема всей страны. В НПО машиностроения проектный менеджмент находится на достаточно высоком уровне. Здесь всегда существовал аппарат ведущих конструкторов. Это – самые настоящие менеджеры проектов. Нужно обратиться к предприятию с просьбой, что бы они сформировали и передали для молодежи философию процесса работы лучших ведущих конструкторов. Многие из них в преклонном возрасте. Нужно обобщить и использовать их опыт.

УДК 658.51

В.А. Бунак, А.Е. Григорьев

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ СТРАТЕГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМ ПРЕДПРИЯТИЕМ

Рассматривается сложная задача разработки и использования методов управления предприятием, определяющих его долгосрочное устойчивое развитие. Сформулированы основные положения и методологические подходы разработки программных положений, составляющих основу стратегии развития предприятия.

1. Введение. Предприятия аэрокосмической отрасли ведут интенсивные научные исследования и поиск путей модернизации производственных процессов, направленные на определение стратегии своего развития в современных экономических условиях [4-7].

Разработка стратегии должна основываться на глубоком понимании и оценке позиции предприятия на рынке, осознании своих производственных возможностей и конкурентных преимуществ. Понятие стратегии неотделимо от нововведений и инноваций, что делает ее разработку и реализацию еще более сложным процессом.

2. Разработка эффективной стратегии. Разработка стратегии развития предприятия аэрокосмической отрасли начинается с определения основных ориентиров предпринимательской деятельности и ее предназначения [1-3]:

- основной замысел, отражающий направления и цели деятельности предприятия, стратегию его развития;
- описание предприятия - его история, показатели, возможности и преимущества;
- стратегические цели и способы их реализации;
- целевые направленности заказчиков, политика сотрудничества;
- отношения с другими организациями и партнерами, обеспечение стабильности в работе.

Для стратегического управления промышленным предприятием важнейшим условием является умение использовать концентрацию имеющихся ограниченных ресурсов на решающих направлениях деятельности и с максимальной эффективностью.

Выбор и реализация стратегии развития предприятия определяется внешними и внутренними техническими, производственно – экономическими и организационными условиями, социально-политической

обстановкой, финансовым положением, степенью конкуренции и монополизации производства в стране и за рубежом.

3. Методология проведения работ. Отечественный опыт показывает, что стратегия развития предприятия может основываться на разработке программных положений и охватывает вопросы:

- развитие предприятия как целого организационного и научно-производственного объекта;
- технологическое развитие разрабатываемых производственных систем;
- развитие внешней среды;
- прогноз результатов производственно-финансовой деятельности;
- формирование перспективной производственной программы развития.

4. Формирование стратегии предприятия. Основные этапы и задачи формирования стратегии развития предприятия требуют учета его характеристик, действующих факторов и условий.

Характеристики предприятия. Достижения в научных, исследовательских и опытно-конструкторских разработках (НИОКР): Открытия, изобретения, лицензии, образцы, научно-технические отчеты. Конструктивно-технологический задел: готовые решения, использование аналогов, преемственность, возможность модификации, применение автоматизации проектирования, ускорение подготовки производства, активность внешнеэкономической деятельности. Производственные мощности, наличие стендово-испытательной базы. Управленческий потенциал, наличие стратегии. Финансовые возможности, ресурсное обеспечение. Интеллектуальный потенциал: уровень маркетингового анализа, переговорных процессов, договорной политики.

Факторы, влияющие на стратегию. Политико-правовые: нормативно-правовые акты, обеспечение национальной безопасности, формирование экономических программ. Социально-экономические: валовой внутренний продукт, объем бюджета, процент государственного финансирования НИОКР в отрасли, инвестиционный климат. Научно-технические: развитие и достижения в фундаментальных и прикладных науках, стимулирование внедрения инноваций, обеспечение качества, патентно-лицензионная работа, интеллектуальный потенциал.

Изменения системы управления. Определение места предприятия на внутреннем и внешнем рынках. Определение логики стратегического планирования, располагаемых ресурсов, стратегии поведения с учетом внешней и внутренней среды, реализации поставленных целей. Установление индивидуальных особенностей предприятия, использование уникальных конкурентных преимуществ. Ориентация управле-

ния на человеческие потребности и интересы, их учет и воплощение на практике. Гибкое и динамичное реагирование на изменения рыночной конъюнктуры.

Этапы формирования стратегии. Анализ научно-технического потенциала, возможностей развития предприятия. Определение направления и целей, выделение стратегических альтернатив развития. Диагностика технических, финансовых, маркетинговых и других возможностей. Согласование возможных стратегических направлений с характеристиками внешней среды и условиями реализации. Оценка альтернативных стратегических решений. Разработка программы научно-технической деятельности.

В условиях недостаточного финансового обеспечения и несовершенства управления, одной из главных задач предприятия становится разработка определенных целевых направлений и возможностей использования научно-производственной деятельности.

4. Принципы управления. Для достижения ключевых целей на долгосрочную перспективу развития предприятия необходимо решение ряда важных задач в областях:

- НИОКР – разработка передовых технологий производства продукции и услуг, использование научно-исследовательского задела;
- производство – обеспечение высокого качества продукции и рациональных затрат труда;
- финансы – сохранение творческого потенциала и заинтересованности в работе;
- маркетинг – занятие ведущего положения на рынке производства продукции и услуг;
- менеджмент определение критических областей приоритетных задач, обеспечение требуемых ресурсов.

В числе основных решаемых задач при построении стратегии развития предприятия можно рассматривать (с ранжированием их отличительной значимости):

- обновление продукции: совершенствование технологии, технологическое перевооружение и реконструкция – 60-70%;
- экономические изменения в области труда: использование информационных технологий в управлении, маркетинг – 10-20%;
- развитие коллектива: условия труда, жилищные и производственные – 8-10%;
- отношения с поставщиками и исполнителями – 5-10%;
- проблемы охраны окружающей среды и др. – 2-5%.

При проведении реконструкции и реформирования предприятия важным является обоснование целей и мероприятий, обеспечивающих

реструктуризацию с целью преобразования деятельности предприятия на долгосрочную перспективу. Конечной целью является установление конкурентного уровня качества продукции, затрат на разработку средств техники, цен на продукцию, сроков разработки и эксплуатации.

5. Заключение. Стратегия развития предприятия аэрокосмической отрасли является определяющей формой его управления. Для реализации стратегии необходимы: наличие определенного научно-технического потенциала, значительные средства и благоприятные внешние и внутренние условия.

Наиболее целесообразным представляется принятие комбинированной стратегии развития предприятия, сочетающей ориентацию на текущий рыночный спрос и перспективу его развития. Сегодняшние условия функционирования предприятия в целях обеспечения конкурентоспособности на внутреннем и международном рынках требует развития и использования имеющихся ресурсов в рамках кооперирования и сотрудничества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. БоуменК. Основы стратегического менеджмента, М.: Банки и биржи, 1997.
2. Грачев К.А., Захарова И.К. Организация и планирование машиностроительного производства (производственный менеджмент), М.: Высшая школа, 2003.
3. Шапиро В.Д., Лукманова Н.Г. Немчин А.М. и др. Управление проектами. СпБ.: «Два Три», 1996
4. Бунак В.А., Григорьев А.Е. Управление разработками средств ракетно-космической техники. // Труды ВНТК «Аэрокосмические технологии» (22 мая 2002, г. Реутов, ФГУП «НПО машиностроения»). – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2003. С. 36-40.
5. Бунак В.А., Григорьев А.Е., Зеленцов В.В. Программно-целевое управление при разработке сложных технических систем. // Труды ВНТК «Аэрокосмические технологии» (22 мая 2002, г. Реутов, ФГУП «НПО машиностроения»). – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2003. С. 41-44.
6. Бунак В.А. Совершенствование научно-технической и производственно-хозяйственной деятельностью головного промышленного предприятия аэрокосмической отрасли. // Материалы Первой МНТК «Аэрокосмические технологии» (РФ, Москва – Реутов, 24 – 25 мая 2004). – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, ФГУП «НПО машиностроения», 2004. С. 300-302.
7. Бунак В.А., Григорьев А.Е. Формирование и реализация проектных решений на головном промышленном предприятии аэрокосмической отрасли. // Материалы Первой МНТК «Аэрокосмические технологии» (РФ, Москва – Реутов, 24 – 25 мая 2004). – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, ФГУП «НПО машиностроения», 2004. С. 300-302.

УДК 378:338.2

В.С. Акопов, В.Л. Малинин

ИННОВАЦИОННАЯ ИНФРАСТРУКТУРА ФРГ

Анализируется инновационная инфраструктура Нижней Саксонии. Авторы на основе научных материалов, полученных ими во время специальной командировки в Германию, применяют системный подход. Анализируются организации и структуры, составляющие элементы системы инновационной инфраструктуры и связи, как между элементами этой системы, так и с внешней средой.

1. Введение. *Ключевые термины и определения*. Существует достаточно большой спектр определения термина «инновация». В связи с этим необходимо в самом начале определить систему понятий и терминологию. Под «инновациями» здесь и далее авторы понимают некое нововведение в любой области человеческой деятельности, приносящее прибыль в условиях рыночной экономики. Под «инновационным продуктом» авторы понимают результат деятельности, содержащий в себе существенную инновацию и обладающий за счет этого дополнительной потребительной стоимостью. Под «инновационной инфраструктурой» понимается система общественных институтов, а также сложившееся распределение прав и обязанностей, как этих институтов, так и отдельных лиц и предприятий, обеспечивающая эффективность процесса создания, апробации и внедрения (в том числе выход на рынок) инноваций и инновационных продуктов.

Анализируя инновационную инфраструктуру, авторы применяют системный подход. Анализируются организации и структуры, составляющие элементы системы инновационной инфраструктуры Нижней Саксонии и связи, как между элементами этой системы, так и с внешней средой. Выделены и рассматриваются отдельно системные связи по двум каналам: информационные и финансовые. Исходя из данной логики, в дальнейшем изложении приводятся основные элементы, составляющие инфраструктуру Нижней Саксонии, а в завершение дается описание информационного обмена между элементами.

2. Инновационная инфраструктура Нижней Саксонии, значение её элементов [1]. Инновационная инфраструктура Нижней Саксонии включает в себя значительное количество элементов, ключевыми из которых можно назвать: Правительство, Инновационный центр, Инновационная сеть, N-bank, предприятия (крупные рассмотрены отдельно от малых и средних предприятий), а так же нижнесаксонские

университеты и научные институты. Ниже эти элементы рассмотрены более подробно с указанием их значения в инновационной инфраструктуре Нижней Саксонии.

Правительство Нижней Саксонии является ключевым элементом инновационной инфраструктуры. Именно земельное правительство во многом определяет политику других элементов инновационной инфраструктуры. Правительство является учредителем двух других значимых элементов инновационной инфраструктуры: Инновационного центра (на 100 %) и N-bank (на 50 %, при этом другие 50 % также контролируются правительством). В структуре правительства есть министерства, деятельность которых существенно влияет на состояние инновационной инфраструктуры: министерство экономики, труда и технологий и министерство науки и культуры. По обзорам в сети Интернет, правительство земли Нижняя Саксония считается одним из наиболее динамичных правительств земель Германии. Премьер министр земли регулярно посещает Россию в рамках деловых поездок.

Инновационный центр – структура (11 человек), целью которой является консультативная поддержка земельного правительства по вопросам определения политической стратегии и разработки оперативных политических мер в сфере развития высоких технологий и инноваций. Центр имеет межведомственный характер. В его задачи входит поддержка следующих министерств Нижней Саксонии: Экономики, труда и транспорта; Науки и культуры; Сельских районов, питания, сельского хозяйства и защиты потребителей; Окружающей среды.

Инновационная сеть представляет собой объединение нижнесаксонских учреждений, занимающихся вопросами поддержки развития инноваций и технологий. Всего в инновационную сеть входит 216 учреждений и организаций. Цели инновационной сети Нижней Саксонии: Повышение эффективности деятельности партнеров по поддержке нижнесаксонских предприятий (квалификация). Повышение эффективности информационных потоков (коммуникация). Канал обратной связи относительно мероприятий правительства земли (дискуссия). Так как деятельность инновационной сети курируется сотрудниками Инновационного Центра, то обеспечивается эффективный канал обратной связи для повышения качества управления.

N-bank – специализированный земельный банк развития, учрежден в 2003 году, собственный капитал 100 млн. евро. Правительство Нижней Саксонии контролирует данный банк полостью. По законодательству ФРГ банк развития не может работать напрямую с конечными клиентами по выдаче кредитов. Его функция в выдаче специализированных кредитов «домашним» банкам клиентов, которые затем вы-

дают кредиты конечным клиентам. Банк выступает исполнителем ряда земельных программ, в частности: программа повышения квалификации сотрудников малых и средних инновационных предприятий (стоимость полностью оплачивает бюджет земли); консалтинговая поддержка клиента (предприятие получает субсидию от 0 до 100 % от стоимости консалтинговых услуг). Существует программа, согласно которой руководитель с опытом и связями соглашается стать консультантом или советником малого предприятия, в этом случае его услуги также оплачивает N-bank. Существенной программой банка является проведение инновационного аудита малых и средних предприятий (бесплатно, за счет бюджета ЕС и земли).

Крупные предприятия. На территории Нижней Саксонии находится ряд крупных предприятий, которые во многом определяют инновационную и научную политику. Среди этих предприятий можно назвать концерн «Фольксваген», концерн «Аирбас». Крупные предприятия самостоятельно проводят свою инновационную деятельность, выделяя на эти средства значительные средства. Вокруг каждого крупного предприятия возникает некая сеть поставщиков продуктов, работ и услуг, значительная часть которых ориентирована на инновации и включена в инновационный процесс.

Малые и средние предприятия. Доля малого и среднего бизнеса в Нижней Саксонии значительна. В нем занято 81 % трудоспособного населения, количество малых и средних предприятий – 95 % и они дают в совокупности 45 % товарооборота. Малые и средние предприятия традиционно считаются локомотивами инновационного процесса: в них меньше бюрократическая надстройка, они более мобильны, новшества в них приживаются быстрее. Разделение труда на них меньше, часто люди занимаются рядом смежных профессий, что приводит к более универсальной специализации сотрудников. Однако есть и свои проблемы: постоянная нехватка финансовых и трудовых ресурсов. Именно для преодоления этих недостатков создана инфраструктура поддержки малых и средних инновационных предприятий.

Научные институты. В Германии существуют чисто научные институты, занимающиеся как прикладной, так и фундаментальной наукой. Они тоже включены в инновационную инфраструктуру через следующие каналы: 1) предприятия устанавливают контакты для консультаций как непосредственно с учеными, так и со структурами в которых они работают; 2) институты участвуют в трансферте технологий, разработанных с их участием, в промышленность; 3) институты выступают экспертами и базами лабораторных исследований для инновационных продуктов.

Специализированные библиотеки. В Германии существует большое количество библиотек, баз данных, баз знаний и других институтов хранения информации. Они частично или полностью финансируются из бюджета земли. Наличие легкодоступных и хорошо структурированных библиотек облегчает инновационный процесс.

4. Университеты как научные и инновационные центры. Начиная с 1984 года, по инициативе земельного правительства в нижнесаксонских университетах добавлена еще одна уставная цель: трансферт (передача, внедрение в практику) технологий. Это изменило принципы финансирования отдельных работ, внесло существенные изменения в содержание контрактов с преподавателями и сотрудниками университета. В контракты включают требования: практического внедрения научно-исследовательских работ, поиска внебюджетных источников финансирования, улучшения связи образования с реальным бизнесом. В каждом университете создан центр передачи технологий, который финансируется частично (2-3 ставки) за счет бюджета земли, частично за счет внебюджетных средств университета, частично за счет спонсоров. В ряде технических университетов создаются производственные и испытательные центры. В них под одной крышей объединены производственные и лабораторные площадки кафедр и институтов университета. Оснащение подобных центров современной лабораторной и производственной техникой позволяет производить в них многие типы испытаний, заниматься междисциплинарными исследованиями. Центры выполняют заказы промышленности по разработке технологических и производственных инноваций.

Университеты и крупные предприятия активно сотрудничают по ряду направлений. Во-первых, предприятия заинтересованы в выпускниках, владеющих современными технологиями, используемыми на их производстве. Это приводит к тому, что предприятия охотно спонсируют университеты, выступают соучредителями производственных центров, выделяют средства на оснащение университетов современной техникой. Во-вторых, предприятия выступают заказчиками на проведение в университетах научных исследовательских и опытно-конструкторских работ по интересующей их тематике. В-третьих, крупные предприятия, стараясь оставаться на современном уровне знаний, делают заказы на повышение квалификации сотрудников предприятия в университетах и оплачивают участие представителей предприятий в научных конференциях и семинарах университета.

Университеты и малый бизнес. В отличие от крупных предприятий, имеющих широкие возможности, фирмы малого и среднего бизнеса контролируют гораздо менее значительные ресурсы. Малые и

средние предприятия вынуждены экономить на издержках, поэтому заказать крупный НИОКР они не в состоянии. Однако именно на малых и средних предприятиях наиболее часто возникают инновации. В связи с этим, как администрация Нижней Саксонии, так и университеты проводят специальную политику по отношению к малым предприятиям. В частности, нам было показано в центре трансферта технологий Ганноверского университета, что проводятся специальные программы по трансферту разработанных в университете технологий в малые предприятия.

3. Ключевые связи в инновационной инфраструктуре. Рассмотрим процесс взаимодействия двух и более элементов инновационной инфраструктуры. Очевидно, что число сочетаний значительно, поэтому рассматриваются только наиболее существенные взаимосвязи. Правительство Нижней Саксонии использует следующие инструменты инновационного стимулирования.

Группа монетарных инструментов: программа стимулирования инноваций; кампания по реализации патентов; кампания по повышению квалификации для среднего бизнеса; стимулирование кадровых трансфертов; кампания по повышению квалификации для среднего бизнеса; программа стимулирования кадровых трансфертов, посвященная связи Правительства с малыми и средними предприятиями.

Группа немонетарных инструментов: консультации; информационное сопровождение процессов; стимулирование; маркетинг региона с ориентацией на инновации. К ним относятся и инструменты инновационной инфраструктуры (ВУЗы, специализированные библиотеки, сетевые структуры); маркетинг региона с ориентацией на инновации; программа популяризации земли как инновационной.

Механизмы согласования интересов Правительства и крупных предприятий. Крупные предприятия, в частности концерны VW, AIRBUS и другие являются одними из основных заказчиков инноваций и научно-исследовательских работ, результатами которых могут стать инновационные продукты и технологии. В качестве механизма согласования интересов используются как формальные контакты (комитеты, рабочие группы), так и неформальные (личные связи). Как пример можно привести два канала оказания взаимного влияния. Один – через профсоюзы, которые оказывают давление, как на администрацию предприятий, так и на правительство с целью недопущения снижения числа рабочих мест и повышения защищенности труда. Второй – через распространенное явление, когда бывший чиновник высокого ранга, уходя на пенсию, работает консультантом частной компании.

Поддержка инноваций в малых и средних предприятиях реализуется правительством в ряде программ. Вот некоторые из них: Программа стимулирования кадрового трансфера, предусматривающая дотацию оплаты труда привлекаемого специалиста. Программа повышения квалификации. Программы N-Банка льготного кредитования страхования рисков инноваций, инновационного аудита. Существуют и определенные сложности. В частности – бюрократический процесс получения льгот для малого предпринимательства и незавершенность формирования механизма честно - государственного партнерства.

Инструменты непрямого стимулирования инновационной деятельности университетов. В Германии сравнительно мала доля государственного заказа на инновационные изделия. Если в США (и в России) государство, выступая заказчиком на инновационные разработки оборонного характера, стимулируют инновационный процесс непосредственно, то в Германии такого мощного прямого инструмента стимулирования инноваций нет. Но широко распространены инструменты непрямого стимулирования инновационной деятельности, часть из которых была уже рассмотрена. Поскольку в Германии университеты финансируются из бюджетов федеральных земель, они, сохраняя некоторую административную самостоятельность, являются государственными инфраструктурными элементами, и правительство определяет политику, в рамках которой они должны развиваться. С 2006 года в университетах Нижней Саксонии вводится специальный налог для обучающихся студентов (500 евро в семестр). Данное новшество было крайне негативно воспринято среди студенчества.

Ярмарки и выставки – инструмент организации и стимулирования развития внешних и внутренних системных связей в инновационной инфраструктуре. В связи с тем, что столица Нижней Саксонии – город Ганновер является местом проведения всемирно известных выставок, данный инструмент широко используется для развития инновационной системы. Происходит знакомство и налаживание связей между предприятиями Нижней Саксонии и остальным миром.

Немецкая Академия менеджмента и ее значение для инновационной инфраструктуры. Пропустив через себя более 21000 менеджеров и создав благодаря этому сетевое сообщество, ориентированное на организацию взаимодействия нижнесаксонских и зарубежных (российских, восточноевропейских, китайских и др.) предприятий, Академия стала важным звеном налаживания внешних связей в рамках инновационной инфраструктуры Нижней Саксонии.

5. Заключение. Основным вопросом при описании и оценке деятельности инновационной инфраструктуры (как и любой другой

социально-экономической системы) является принцип расстановки людей и принцип распределения экономических ресурсов в ней. Авторы учитывают то, что рассматриваемая инфраструктура есть производная от системы взаимоотношений в рамках конкретного социума, что означает невозможность автоматического переноса опыта инновационного развития Федеративной Республики Германия (ФРГ) и инновационной инфраструктуры ФРГ на российскую почву без необходимой адаптации.

Ключевым принципом эффективности инновационной деятельности авторы считают необходимость создания эффективной инновационной инфраструктуры в широком смысле этого слова. Инновационная деятельность будет эффективна тогда и только тогда, когда создана эффективная инновационная инфраструктура. Это означает, что необходимо выстроить систему общественных институтов и связей между ними так, чтобы максимально облегчить и ускорить процесс создания и введения в обращение инновационных продуктов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Христиан Вульф (премьер-министр Нижней Саксонии), Центр экономики Нижней Саксонии. //Сайт ИД «Экономическая газета», 2006. http: // WWW.ideg.ru

УДК 65.011.46

Е.В. Строкова

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ИНТЕГРИРОВАННОГО УПРАВЛЕНЧЕСКОГО УЧЕТА НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Рассматриваются вопросы совершенствования системы управленческого учёта в высшем образовательном учреждении на основе современных экономических методов.

1. Введение. Успех социально-экономического развития страны в значительной мере зависит от эффективности деятельности высших профессиональных учебных заведений, от качества организации и подготовки специалистов высшей квалификации. Этим обусловлена актуальность проблемы внедрения современных методов управления, обеспечивающих надлежащий уровень взаимодействия структурных подразделений вуза. В условиях динамического развития экономики они способствуют непрерывному развитию на основе новейших достижений в сфере управления. Предприятия и учреждения, став объектами товарно-денежных отношений, обладающими экономической самостоятельностью и полностью отвечающими за результаты своей хозяйственной деятельности, должны самостоятельно формировать у себя систему профессионального менеджмента, которая обеспечит высокую эффективность работы, конкурентоспособность и устойчивость положения на рынке.

Перспективы введения в России Международных стандартов финансовой отчетности (МСФО) для предприятий с различными организационными формами, желающих конкурировать на мировом рынке, с привлечением внешних пользователей: кредиторов, инвесторов, поставщиков, покупателей, работников, объясняет их практическую заинтересованность в создании интегрированной системы учета организационно-экономической деятельности. Управлять крупным предприятием, а равно и крупной образовательной организацией (научно-образовательным комплексом) с максимальной отдачей невозможно без создания полноценной управленческой системы учета, основанной на автоматизации основных бизнес-процессов и единой информационной системе, построенной как совокупность интегрированных подсистем предприятия.

2. Анализ методов построения организационных структур научно-образовательного комплекса. Среди иных видов организаций,

решающих близкие задачи, широко распространены НПО – научно-производственные объединения. Их можно условно описать формулой «НИИ + промышленное предприятие». Необходимость НПО вытекает из потребностей менеджмента высоких технологий на наукоемких производствах: для выпуска инновационной продукции необходимо постоянное взаимодействие науки и производства. Не менее очевидна необходимость подготовки инженерно-технических и управленческих кадров. Инновационным характером современного производства обусловлена потребность в научно-образовательных комплексах (НОК), которые можно условно описать формулой «НИИ + вуз + промышленное предприятие».

Примером НОК является Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана. В его рамках успешно действует ряд структур, направленных на реализацию формулы «НИИ + вуз + промышленное предприятие». Так, в состав научно-учебных комплексов (НУК) входят факультеты и НИИ. Этим достигается реальная интеграция учебной и научной работы. Факультеты организуют учебную работу, НИИ проводят фундаментальные, поисковые и прикладные исследования по основным направлениям подготовки специалистов. Преподаватели кафедр участвуют в научной работе, сотрудники НИИ – в учебном процессе, передавая результаты своих исследований будущим специалистам. И факультеты, и НИИ работают в тесном контакте с наукоемкими промышленными предприятиями.

Другая форма работы НОК МГТУ им. Н.Э. Баумана – это отраслевые факультеты, действующие непосредственно на базовых наукоемких промышленных предприятиях. Для отраслевых факультетов разработана система подготовки специалистов по дневной форме обучения с непрерывной научно-производственной практикой на предприятии. Естественно, что научные разработки, выполненные в МГТУ им. Н.Э. Баумана, внедряются на базовых наукоемких промышленных предприятиях.

Перспективным является включение в состав НОК бизнес-инкубаторов и технопарков. В нашем понимании бизнес-инкубатор – это организационная структура, которая создаёт наиболее благоприятные условия для стартового развития творческих коллективов, осуществляющих инновационные разработки, путём предоставления комплекса услуг и ресурсов. Комплекс услуг – секретарских, бухгалтерских, юридических, образовательных, консалтинговых – это одно из самых главных условий, потому что именно комплексность имеет значение для стартового развития творческих коллективов, осуществляющих инновационные разработки. В более широких масштабах ин-

новационная деятельность развертывается в рамках технопарка НОК. Технопарк – это комплекс инфраструктурных объектов. Его основная цель – мотивировать творческие коллективы и отдельных исследователей создавать инновационные технологии, помогать и тем, и другим реализовывать эти инновации в успешных продуктах. Для успешной инновационной деятельности, необходима также структура, занимающаяся организационно-экономическим обеспечением: маркетинговыми исследованиями, подготовкой бизнес-планов, проведением экспертиз, использованием информационных технологий.

Структура бизнеса под воздействием объективных различных факторов, обусловленных новыми технологиями, государственным регулированием и ростом предприятий, постоянно усложняется. Возникает потребность в дроблении ее на множество юридических лиц с одновременным развитием многих направлений деятельности и формированием значительного количества структурных подразделений (отделов, служб) как на уровне отдельных юридических лиц, так и на уровне холдингов.

Системный подход к управлению предприятием показывает, что залогом качественного управления является целостная административная система управления. Современная система управления подчеркивает высокий уровень компетентности руководства предприятия, повышая тем самым уровень доверия инвесторов к нему.

3. Интегрированная система управленческого учета организационно-экономической деятельности предприятия [1-3]. Классификация видов учета представлена в таблице 1.

Таблица 1.

№ п/п	*Наименование вида учета*	*Назначение вида учета*
1	Бухгалтерский учет	Для предприятия и сторонних пользователей. Требуется по законодательству
2	Налоговый учет	Для налоговых служб. Требуется по законодательству
3	Управленческий учет	Для нужд управления предприятием. Ведется по решению руководства предприятием.
4	Статистическая отчетность	Для Федеральной службы государственной статистики. Требуется по законодательству

Место управленческого учета в организационной структуре НОК показано на рис.1. Разработаны компоненты, уровни и параметры системы управленческого учета. Параметры выделяются консультантом при анализе структуры бизнеса. Они носят нечисловой характер, – это направления бизнеса, центры дохода и центры затрат. В результате

дробления по направлениям и центрам дохода управленческий отчёт о прибылях и убытках за отчётный период, будет иметь матричную структуру. Под центрами затрат понимаются структурные подразделения предприятия, выполняющие определённые функции и имеющие, либо могущие иметь, собственные бюджеты затрат.

Для проведения анализа организационно-экономического состояния предприятия в качестве исходных данных могут выступать, с одной стороны, форма № 1 бухгалтерской отчетности предприятия или балансовая ведомость проекта либо, с другой стороны, данные шахматного бухгалтерского баланса.

Рис. 1. Схема системы управленческого учета в организационной структуре НОК

Анализ организационно-экономической устойчивости любого хозяйствующего субъекта является важнейшей характеристикой его деятельности и финансово-экономического благополучия. Индикаторы организационно-экономической устойчивости целесообразно вводить отдельно для внутрисистемной производственно-сбытовой подсистемы (I_1), отдельно для рыночной подсистемы (I_2), а также учитывать при анализе производственно-хозяйственной деятельности взаимовлияние рыночной подсистемы и деятельности предприятия (I_3). В со-

ответствии с разработками научной школы МГТУ им. Н.Э. Баумана в области организационно-экономической устойчивости:

$$I_1 = I_{\text{об.пр-ва}}\, I_{\text{п-т,п}}\, I_{\text{ф.э}}\, I_{\text{э}},$$

где $I_{\text{об.пр-ва}}$ – показатель объемов производства, $I_{\text{п-т,п}}$ – показатель производственно-технологического потенциала, $I_{\text{ф.э}}$ – показатель финансово-экономической стабильности, $I_{\text{э}}$ – показатель экологичности производственной деятельности;

$$I_2 = I_{\text{пост}}\, I_{\text{потр}}\, I_{\text{кон}},$$

где $I_{\text{пост}}$ – показатель устойчивости относительно поставщиков, $I_{\text{потр}}$ - показатель устойчивости на потребительском рынке, $I_{\text{кон}}$ - показатель устойчивости относительно конкурентов;

$$I_3 = I_{\text{р.с}}\, I_{\text{спр}},$$

где $I_{\text{р.с}}$ – показатель изменения рыночной среды (в результате деятельности предприятия, $I_{\text{спр}}$ – показатель степени обеспечения потребительского спроса.

В качестве интегральной оценки деятельности предприятия в рыночной инфраструктуре принимается интегральный показатель организационно-экономической устойчивости функционирования предприятия:

$$I = k_1 I_1 + k_2 I_2 + k_3 I_3,$$

где k_1, k_2, k_3 – коэффициенты, учитывающие значимость взаимоотношений предприятия соответственно с внутрисистемной производственно-сбытовой и рыночной подсистемами, а также взаимовлияние рыночной подсистемы и деятельности предприятия. При этом под финансовой устойчивостью предприятия следует понимать его платежеспособность во времени с соблюдением условия финансового равновесия между собственными и заемными финансовыми средствами.

Разработаны методы расчета точки финансового равновесия и содержание управленческого отчета об организационно-экономическом состоянии предприятия. Смета доходов и расходов, как составная часть бухгалтерского учета, является эффективным инструментом для принятия управленческого решения.

На основе международных стандартов бухгалтерского учёта IAS разработана учётная политика - набор правил, в совокупности отвечающих на вопрос, что и как отражается в системе управленческого учёта [2]. Разработаны методы и модели ведения управленческого учета с применением баз данных, служащих источниками информации для формирования отчётов. Система ведения управленческого учета может включать в себя автоматизацию в том, что касается группировки операций по счетам, видам, центрам затрат, по кодам движения денежных средств, и ручную доводку при получении отчёта о прибылях

и убытках, в котором требуется распределять расходы, делать начисления, производить консолидацию и подсчитывать промежуточные результаты. Наряду с форматами отчётов консультант разрабатывает *формат* аналитической записки, где описывались бы важнейшие результаты анализа управленческой информации и делались выводы.

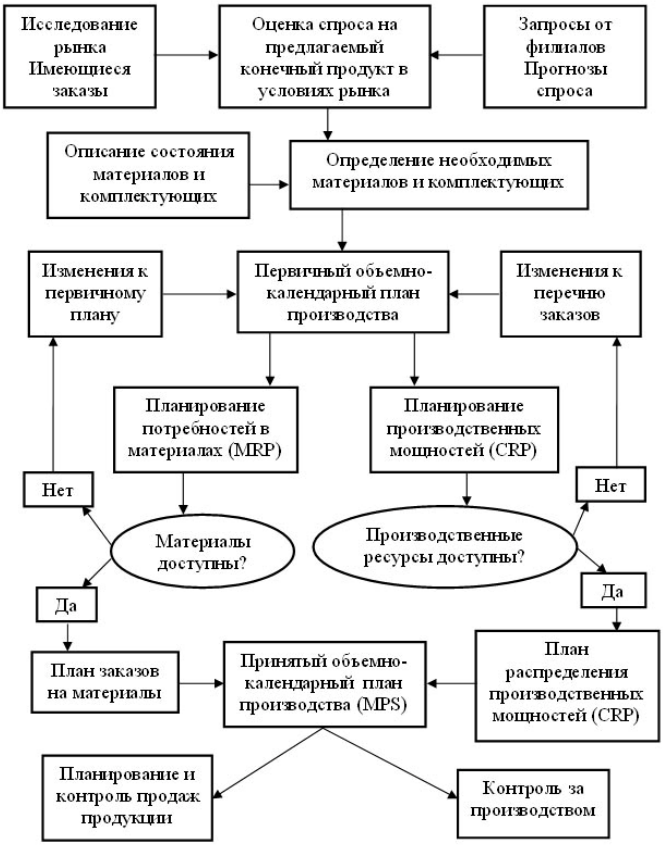


Рис. 2. Логическая структура системы планирования ресурсов предприятия

На основе проработки логической структуры (рис.2) системы планирования ресурсов предприятия переходим к использованию системы, поддерживающей принцип ERP и имеющей возможность применения на предприятиях с территориально распределенной структу-

рой. Под организацией с территориально распределенной структурой (ТРС) понимаем совокупность юридических лиц, включающую основное и дочерние предприятия, полностью или частично объединившие свои материальные и нематериальные активы.

Цель создания ТРС – технологическая или экономическая интеграция для реализации инвестиционных и иных проектов и программ, направленных на повышение конкурентоспособности и расширение рынков сбыта товаров и услуг, повышение эффективности производства, создание новых рабочих мест. Одним из основных направлений развития системы управления ТРС является разработка и применение концепции контроллинга, обеспечивающей системную интеграцию различных аспектов управления бизнес-процессами предприятий-участников. К наиболее важным практическим инструментам и принципам стратегического управления относят: матричные аналитические инструменты, алгоритмы работы со «слабыми» и «сильными» сигналами, принципы управления спросом и предложением, финансовую оценку стратегических планов, функционально-стоимостной анализ, стратегическое управление затратами. Главная цель оперативного контроллинга – создание эффективной системы управления для достижения текущих целей предприятий ТРС, путем оптимизации соотношения «затрата-прибыль». Ориентация на краткосрочные цели определяет для оперативного контроллинга следующие контролирующие показатели: рентабельность, ликвидность, производительность и прибыль.

4. Принципы и методы построения управленческого учета в научно-образовательном комплексе. Важны действующий порядок создания обособленного структурного подразделения НОК и специфические особенности бизнес-деятельности обособленных структурных подразделений. Одной из основных задач при внедрении экономических принципов управления НОК является разработка и организация электронной системы документооборота.

На протяжении последнего десятилетия в условиях экономической нестабильности страны наблюдается активная борьба НОК за выживаемость на рынке образовательных услуг. По мере становления рынка образовательных услуг НОК все труднее добиваться конкурентных преимуществ за счет экстенсивных способов развития, то есть за счет вертикальной и горизонтальной дифференциации и коммерциализации образовательных услуг. Возрастает необходимость использования интенсивных методов управления, то есть развитие НОК за счет внутренних резервов и, прежде всего, за счет организационно-экономических механизмов регулирования. Один из интенсивных ме-

тодов развития НОК основан на интеграции всех бизнес-процессов и направлений деятельности.

План развития НОК позволяет оперативно управлять хозяйственным процессом, отслеживать степень достижения поставленных целей, грамотно контролировать устойчивость НОК и оптимизировать управленческие решения. Чтобы разработанный стратегический план реализовать, необходимо пользоваться управленческими инструментами, прежде всего *бюджетированием* и *управлением по целям.* Среди конкретных интенсивных методов развития НОК отметим метод, основанный на создании и развитии таких структурных подразделений, как бизнес-инкубаторы и технопарки, что требует разработки нормативно-правовой базы, обеспечивающей решение ряда организационно-экономических проблем. Разработана интегрированная система управленческого учета организационно-экономической деятельности НОК. Ее основой является организационная структура управления, представляющая собой развитие схемы, показанной на рис.3.

Экономические методы управления (*ЭМУ*) определяют уровень бизнес-деятельности научно-образовательного комплекса. Специально разработанная нами методика основывается на том, что ЭМУ – это, прежде всего, определенный порядок применения в практической деятельности объективных экономических законов; ЭМУ обеспечивают целенаправленное влияние на экономические интересы, как отдельного члена коллектива, так и коллектива в целом для достижения оптимальных результатов их функционирования. Показано, что центральная бухгалтерия – центр управленческого учета организационно-экономической деятельности НОК (рис.4).

Рис. 3. Организационная структура Университета (верхний уровень)

Рис. 4. Структура Центральной бухгалтерии – центра управленческого учета

Разработана интегрированная система управленческого учета НОК. Схема на рис.1 дает представление о взаимосвязях пользователей отчетных документов в условиях интегрированности разнородных систем учета в единую управленческую систему. При этом определены сферы ответственности и уровни доступа к ИСУ НОК. Для обеспечения эффективного планирования ресурсов диверсифицированная деятельность НОК требует оперативного регулирования финансовых потоков, построения схем производственной и маркетинговой логистики, получения руководством полной и своевременной информации о движении финансовых ресурсов, их направлении, видах затрат, формировании центров затрат и центров дохода. Полученные в работе результаты позволяют решить указанные задачи.

5. Заключение. В соответствии с поставленной в работе целью получены следующие результаты:

- Сформирована система организационных показателей оценки экономического эффекта при обосновании выбора вида и структуры такой системы.
- Разработаны принципы и методы построения управленческого учета в НОК в зависимости от его масштаба и структуры.
- Разработана и внедрена структура управления НОК, основанная на экономических методах управления.
- Разработан и внедрен ряд предложений, направленных на совершенствование системы управленческого учета НОК. Для минимизации налога на прибыль разработаны и утверждены: план счетов;

аналитические регистры налогового учета; разработочные таблицы; программное обеспечение; «Порядок определения доходов и расходов по платным образовательным услугам». Разработаны и апробированы методы оценки организационно-экономической устойчивости предприятия для проведения экспресс-анализа, шкала и зоны организационно-экономической устойчивости. Предложены аналитические финансовые таблицы для проведения развернутого анализа. Для обособленных структурных подразделений разработаны методы проведения анализа организационно-экономического состояния и осуществления текущего и оперативного управления организационно-экономической устойчивостью НОК.

- Разработаны модель информационного обеспечения организации для обеспечения оптимального стратегического планирования ее деятельности, в зависимости от различных условий внутренней и внешней среды, и концепция ИСУ НОК.

- Сформированы требования к ИСУ в рамках выполнения задач контроллинга и предложения по организации управления с использованием ИСУ в НОК. Осуществлена апробация разработанной методики управления с использованием ИСУ в НОК с разветвленной организационной структурой.

- В целях обеспечения возможности оперативно структурировать и глубоко детализировать затраты Университета самостоятельно разработано собственное программное обеспечение. Проведен анализ топологической схемы сети Центральной бухгалтерии, сформулированы требования к системе в целом, структуре и функционированию сети; к квалификации персонала и режиму работы; к программному обеспечению; к техническому обеспечению и документации. Разработаны рекомендаций по повышению эффективности функционирования локальной вычислительной сети Центральной бухгалтерии НОК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Строкова Е.В. Слияние форм // Российское предпринимательство. – 2002. - № 4. – С. 106-110.
2. Строкова Е.В. Интегрирование российского учета в международные стандарты // Материалы научно-практической конференции сотрудников международных служб вузов г. Москвы в МГТУ им. Н.Э.Баумана. – 2002. - С. 31-39.
3. Строкова Е.В. О проблемах учета НДС, дебиторской задолженности и о новой инструкции // Сборник материалов конференции РИЦ МГИУ. – 2003. – С. 70-72.

УДК 378:338.2

А.И. Яковлев

ОБ ИНСТИТУЦИОНАЛЬНОМ УПРАВЛЕНИИ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬЮ И НАУЧНО-ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ

Важность и актуальность решения проблем инновационной деятельности во многом определяется тем очевидным фактом, что успешное развитие экономики России и бизнеса связано с повышением конкурентоспособности российских товаров, услуг, технологий, предприятий, видов экономической деятельности, кластеров, регионов и страны. Под конкурентоспособностью понимается экономическая категория, которая характеризует объекты и субъекты экономического соревнования, борющиеся за ограниченный объем платежеспособного спроса потребителей и государства, за ограниченный объем платежеспособного спроса. С системных позиций конкуренция как состязательность хозяйственных субъектов рассматривается в виде конфликта, исследуемого теорией игр.

Достижение конкурентоспособности и успешного развития страны в целом основывается на институциональном управлении научно-инновационной деятельностью и через нее конкурентоспособностью различных объектов. Акцентируется внимание на необходимость усиления изменений в системе экономических и социальных институтов, реализации институционального управления в научно- инновационной сфере путем развития институтов адаптации научно- технического комплекса России к рыночным условиям. В основу анализа конфликтных ситуаций при конкуренции положена теоретико- множественная модель как совокупность взаимодействующих элементов или коалиций. Проанализированы различные методы управления научно-инновационным комплексом.

В настоящее время по рассматриваемым вопросам проведены исследования в ряде организаций: в РАН (под руководством профессора Комкова Н. И.), в Государственном университете - Высшей школе экономики (под руководством профессоров Е. Ясина и А. Яковлева), в Союзе предпринимателей и промышленников (под руководством профессора Евтушенкова В. П.). Результаты исследований убедительно показывают, что введение современного институционального управления научно-инновационными процессам надежно входит в жизнь и, как правило, обеспечивает повышение прибыли, снижение издержек, повышение конкурентоспособности научно- исследовательских комплексов.

УДК 338.2

В. А. Поляченко

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ «НПО МАШИНОСТРОЕНИЯ»: ТРАДИЦИИ И ЛИДЕРСТВО

Дан анализ применения инновационных технологий в разработках передового предприятия ракетно-космической отрасли промышленности «НПО машиностроения» за период от возрождения в 1954 году до настоящего времени. Показано, что в разработки предприятия внедрено более 500 изобретений. Многие из них имеют всемирное значение. Основная масса изобретений еще ждет своего часа. Отмечена необходимость создания базы имеющихся авторских свидетельств и патентов, доступной для повседневного использования.

1. Введение. Тематика работ НПО машиностроения охватывает разработку систем и летательных аппаратов, стартующих и движущихся в трех средах ноосферы: море, земля, небо. При этом: море – от поверхности до критических глубин погружения подводных лодок, небо – от приземных высот до дальнего космоса. Такая диверсификация тематики – сама по себе высшей пробы инновационная технология организации работы коллектива, основанная на его совокупном интеллекте и мастерстве. Инновационные технологии, способы решения практических задач при максимальных нововведениях – это традиции предприятия, основа деятельности. Благодаря этому предприятие по праву является лидером в аэрокосмической отрасли промышленности.

Иллюстрацией этого может послужить тот факт, что за период, прошедший с возрождения предприятия, с 1954 года, в тематические разработки внедрено 514 изобретений наших сотрудников, на которые имеются авторские свидетельства и патенты. Остановимся лишь на наиболее значимых инновационных решениях.

2. Комплексы крылатых ракет. При их разработке внедрено 280 авторских свидетельств на изобретения, 3 патента.

Крылатая ракета П-5. Начало разработки – 1954, сдача на вооружение – 1959 год. Прорывной технологией в создании крылатых ракет для вооружения подводных лодок явилась технология старта крылатой ракеты непосредственно из контейнера с раскрытием крыльев в полете. Первенство подтверждают авторские свидетельства Челомея В.Н. об изобретении с приоритетом от 29.12.1954 г. Это нововведение на долгие годы обеспечило превосходство наших разработок ракетного оружия для морских носителей в стране и в мире.

Крылатая ракета П-6. Начало разработки – 1956, сдача на вооружение – 1964. П-6 – первая в мире самонаводящаяся противокорабельная ракета (ПКР) для вооружения подводных лодок. Новым направлением явилось вооружение подводных лодок, надводных кораблей, береговых комплексов противокорабельными крылатыми ракетами с загоризонтной дальностью стрельбы, с автономным управлением и с телеуправлением. Впервые было осуществлено построение системы морской космической разведки и целеуказания, сопряжение её с противокорабельной ракетой. Вооружение подводных лодок комплексом оружия с противокорабельной ракетой П-6 создало условия для паритета с вероятным противником на море.

Крылатая ракета «Аметист». Начало разработки – 1959, сдача на вооружение – 1968. «Аметист» – первая в мире крылатая ракета с подводным стартом. Технология подводного старта крылатой ракеты, снижающая уязвимость подводной лодки – носителя ракетного комплекса «Аметист» – следующий шаг развития инновационных технологий на предприятии. В то время это было совершенно новое решение, что подтверждают авторские свидетельства об изобретениях.

Крылатая ракета «Гранит». Начало разработки – 1969, сдача на вооружение – 1983. «Гранит» – первая и единственная в мире система ракетного вооружения, реализующая организованные групповые действия при нанесении удара по противнику. Создание комплекса ракетного оружия «Гранит» было асимметричным ответом растущей угрозе со стороны авианосных ударных группировок вероятного противника. Его разработка базировалась на внедрении новых технологий, в основе которых лежали более двух десятков изобретений. Среди них: Технология подводного старта крылатой ракеты с запуском воздушно-реактивного двигателя в полете. Технология автономного управления крылатой ракетой по схеме – «выстрелил-забыл». Технология построения наряда крылатых ракет при залповой стрельбе, их целераспределения. Этим комплексом и сегодня вооружены атомные корабли и подводные лодки, в том числе флагман отечественного флота «Петр Великий».

3. Баллистические ракеты и ракеты-носители. В разработки внедрено 32 авторских свидетельства на изобретения.

Ракета УР-500К. Начало разработки – 1962, сдача в эксплуатацию – 1978. Ракета УР-500К («Протон-К») – ракета-носитель тяжелого класса для выведения на околоземные орбиты тяжелых КА (до 20 тонн), поныне несущая службу в интересах отечественной и мировой космонавтики. При совместной работе предприятия ОКБ-52 и его филиала №1 в основу разработки были положены новые принципы

строительства ракет, до этого не применявшиеся в отечественном ракетостроении: Максимальные габариты ракеты, обеспечивающие доставку готовых ступеней с завода-изготовителя на космодром в условиях существующей транспортной инфраструктуры для их ускоренной сборки на технической позиции. Компоновка первой ступени ракеты в виде полиблока (центральный блок – бак окислителя, боковые навесные блоки – баки горючего). Кроме того, в конструкции, технологии производства и эксплуатации ракеты воплощено много оригинальных решений, защищенных авторскими свидетельствами об изобретениях.

Ракетный комплекс с МБР УР-100. Начало разработки – 1963, сдача на вооружение – 1967. УР-100 – первая боевая межконтинентальная баллистическая ракета (МБР), созданная нашим предприятием. Она стала самой массовой ракетой в РВСН. Постоянная боеготовность при длительных сроках нахождения на боевом дежурстве сделали ее эффективным средством сдерживания от любых попыток нарушить стратегический паритет. При ее создании были внедрены совершенно новые технические и технологические решения, в том числе: Длительное хранение, обеспечивающее удобство эксплуатации в заправленном и боеготовом состоянии за счет ампулизации ракеты и ее размещения в герметичном транспортно-пусковом контейнере (ТПК). Автоматизация предстартовой подготовки и пуска ракеты (2 авторских свидетельства). Повышение боевой живучести путем разнесения шахтных пусковых установок (ШПУ «ОС» – одиночный старт).

Ракетный комплекс 15П135 с МБР УР-100Н УТТХ. Начало разработки – 1976, сдача на вооружение – 1980. МБР УР-100Н УТТХ (15А35, РС-18) – первая в стране межконтинентальная ракета, оснащенная разделяющейся головной частью с индивидуальным наведением боевых блоков (РГЧ ИН). Находится на боевом дежурстве до настоящего времени. (УТТХ – вариант с улучшенными тактико-техническими характеристиками). При создании этой боевой ракеты были внедрены новые технологии, которые защищены авторскими свидетельствами. Среди них: Технология разведения боевых блоков с индивидуальным наведением по целям – РГЧ ИН. Повышение точности и стойкости к поражающим факторам применением высокоскоростных боевых блоков. Технология преодоления противоракетной обороны комплексом активных и пассивных средств. Технология увеличения сроков эксплуатации ракетного комплекса, обеспечивает нахождение этих ракет на боевом дежурстве до настоящего времени, что было отмечено Президентом В.В. Путиным.

4. Космические системы, комплексы и аппараты. В эти разработки внедрено 199 авторских свидетельств на изобретения.

Система глобальной морской космической разведки и целеуказания, космические аппараты УС-А, УС-П. Начало разработки – 1961, сдача в эксплуатацию – 1978. Первая в мире система глобальной морской космической разведки и целеуказания (МКРЦ) для беспропускного обзора акваторий Мирового океана комплексом разведывательных КА в интересах применения противокорабельного ракетного оружия кораблями и подводными лодками ВМФ. Это была одной из первых космических систем, разработанных нашим предприятием, и в то же время первая в мире система такого назначения. В наших разработках применялись наиболее передовые технические решения, в то время имевшие мировой приоритет. Среди них: Комплексная система взаимодействия морской космической разведки и целеуказания (МКРЦ) с комплексами противокорабельных крылатых ракет (ПКР). Применение бортовой ядерной энергоустановки (ЯЭУ) космического аппарата (КА) (защищено авторским свидетельством). Технология однопунктового управления космической системой.

Ракетно-космический комплекс «Алмаз», 1964 – 1978 г.г.

Пилотируемый ракетно-космический комплекс создан впервые в стране для ведения глобальной комплексной детальной разведки наземных малоразмерных объектов. Ракетно-космический комплекс «Алмаз» разработан в составе: 1. Орбитальная пилотируемая станция (ОПС). 2. Транспортный корабль снабжения (ТКС). 3. Возвращаемый аппарат (ВА). 4. Капсула специнформации (КСИ).

Орбитальная пилотируемая станция ОПС «Алмаз» положила начало всем пилотируемым станциям в стране. В разработки этих космических аппаратов внедрены совершенно новые технологии, защищенные авторскими свидетельствами (а.с.). Среди них: Технология обработки экспонированной фотопленки на борту с передачей изображений на Землю. Технология высокоточного управления с электромеханическими системами поворота и стабилизации станции (8 а.с.). Технология раскрытия солнечных батарей большой площади (4 а.с.). Управляемый спуск ВА в атмосфере на аэродинамическом качестве (2а.с.). Конструкция и технология изготовления люка в теплозащитном днище ВА для перехода экипажа на орбите (а.с.). Технология восстановления теплозащитного покрытия после полета и обеспечения многоразового применения ВА.

5. Разработки XXI века

Крылатая ракета «Яхонт». Начало разработки – 1982, сдача на вооружение – 2002. «Яхонт» – унифицированная противокорабельная крылатая ракета (ПКР) для вооружения подводных лодок, надводных кораблей, береговых ракетных установок, авиационных носителей. Ра-

кета «Яхонт» оснащена регулируемым двигателем СПВРД, обеспечивающим полет со сверхзвуковыми скоростями в широком диапазоне высот. Разработка новой противокорабельной ракеты 4-го поколения была начата в первой половине 80-х, однако и сегодня она является вполне современным и востребованным оружием как для нашего ВМФ, так и для зарубежных стран. Это – следствие тех инноваций, которыми был наполнен проект этого комплекса. Вот лишь наиболее важные, защищенные авторскими свидетельствами (а.с.): Ампулизация снаряженной на заводе-изготовителе крылатой ракеты в транспортно-пусковом стакане (ТПС) для хранения, эксплуатации, постоянной боеготовности (3 а.с.). Технология минометного старта из ТПС (3 а.с.). Универсальность базирования на различных типах носителей (2 а.с.). Универсальность по видам старта – надводный, подводный, наклонный, вертикальный.

Развитие по способам базирования ПКР «Яхонт». В последние годы комплекс с ПКР «Яхонт» получил дальнейшее развитие. В качестве экспортных вариантов, помимо традиционных, с базированием на морских носителях, предлагаются: Подвижный ракетный комплекс «Бастион» с унифицированной ПКР «Яхонт» обеспечивает эффективную защиту морского побережья от любых корабельных группировок противника. Стационарный ракетный комплекс «Бастион-С» с унифицированной ракетой «Яхонт» – первый в мире комплекс шахтного базирования с крылатой ракетой. Авиационный ракетный комплекс с унифицированной ПКР «Яхонт» обеспечивает эффективное поражение морских и прибрежных целей.

Развитие по типам целей. Разработана и внедряется технология наращивания оперативно-тактических возможностей противокорабельной крылатой ракеты, позволяющая носителю с боекомплектом универсальных ракет «Яхонт» решать задачи поражения как морских, так и наземных целей.

Развитие космических систем. В направлении космических систем и аппаратов ведется разработка проекта «Космическая система дистанционного зондирования Земли «Кондор-Э». Она базируется на ряде инновационных решений, среди которых: Технология построения системы малых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на базе унифицированной космической платформы. Технология электромеханического разворота крупногабаритной антенны.

7. Заключение. Другие разработки, ведущиеся сегодня на предприятии, по понятным причинам не могут быть представлены широкой аудитории. Но и перечисленные примеры дают представление об инновационном характере этих работ.

Понятие инновация от английского «innovation» в буквальном переводе – «новшество». Важно, однако, чтобы здесь присутствовали кроме новизны полезность и значимость. В разработки предприятия внедрено более 500 изобретений, уже по определению обладающих новизной и полезностью. Многие из них имеют всемирное значение, что проиллюстрировано на примерах. Однако основная масса изобретений сотрудников НПО машиностроения (всего имеется 2482 авторских свидетельства и 55 патентов) еще ждет своего часа.

Для того, чтобы пришедшая на смену молодежь не «изобретала велосипед», целесообразно создать современную базу имеющихся авторских свидетельств и патентов, доступную для повседневного использования. Это будет не менее важная инновационная технология.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефремов Г.А. Современная концепция обеспечения национальной безопасности и стратегические задачи НПО машиностроения. // Труды Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмические технологии» (22 мая 2002, г. Реутов, ФГУП «НПО машиностроения»). – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2003. С. 8-15.
2. 60 лет самоотверженного труда во имя мира. ФГУП «НПО машиностроения». – М.: Издательский дом «Оружие и технологии», 2004. 332 с.

УДК 658.336

Л.С. Точилов

ЗАКРЕПЛЕНИЕ МОЛОДЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ОПК

Рассматривается кадровая проблема предприятий оборонно-промышленного комплекса. Анализируются возможные формы взаимодействия государства, вуза и предприятия. Приведены примеры наиболее эффективных форм. Подчёркнуто значение организующей роли государства.

1. Введение. Одной из наиболее сложных проблем, с которыми сталкиваются предприятия оборонно-промышленного комплекса (ОПК) России – дефицит молодых специалистов. Чтобы решать эту проблему необходимо привлечь выпускников вузов на предприятия, передать им необходимые для работы знания и закрепить в коллективе. Каждая из этих задач не имеет универсального решения.

О том, что студенты-бюджетники после вуза должны отработать 5 лет на госпредприятиях говорил, в частности, первый вице-премьер С.Б. Иванов. Для получения квалификации, достаточной для самостоятельного выполнения сложных и ответственных работ по специальности на предприятиях аэрокосмической отрасли, выпускнику, по мнению экспертов, необходимо проработать примерно 5 лет. Однако и целевое распределение не решает всех аспектов кадровой проблемы. Предприятия ОПК вынуждены использовать другие факторы.

В решении кадровой проблемы участвуют три стороны: Общество в лице государства (даёт деньги вузам), вузы (выпускают молодых специалистов), предприятия ОПК (принимают молодых специалистов, выпускают продукцию и платят налоги государству). Но пойдут ли выпускники на работу по специальности – неизвестно. Решение задачи зависит от взаимодействия этих трёх сторон. В докладе на XXVI Академических чтениях по космонавтике [1] рассматривался подход, при котором государство могло бы путём мониторинга оценивать степень обеспечения вузами предприятий ОПК молодыми специалистами, поддерживая в большей степени те вузы, выпускники которых идут работать по специальности. Ведь проблема эта и государства, и вузов, и предприятий ОПК.

2. Привлечение выпускников вузов на предприятия ОПК. Для решения рассматриваемой задачи предприятия ОПК пытаются выстраивать отношения с вузами так, чтобы те ориентировали своих сту-

дентов на работу в этих предприятиях. Ведь порой студенты лишены достоверной информации о предприятиях, где они могут работать по своей специальности. Формат «Ярмарок вакансий», раз в год организуемых вузами, не решает этой задачи. Интересно отметить, что эти мероприятия привлекают немало студентов младших курсов, что подтверждает потребность в информации о возможных местах трудоустройства и её дефицит.

Второе, более углублённое, направление взаимодействия между предприятиями ОПК и вузами – производственная практика. Однако, достичь такой согласованности, при которой на практику будут приходить студенты по требующимся специальностям, в требуемом количестве и заинтересованные в работе по специальности довольно сложно, как и в случае любого индивидуального подбора. А без этого эффект от проведения производственной практики студентов для предприятий ОПК часто не оправдывает их ожиданий.

Третья, наиболее эффективная, форма взаимодействия осуществляется вузами или их подразделениями при предприятиях ОПК. Появляется возможность индивидуального подхода к определению рабочего места для каждого студента. Как показывает опыт Аэрокосмического факультета МГТУ имени Н.Э.Баумана при ОАО "ВПК "НПО машиностроения", эта форма даёт хорошие результаты. Безусловно, за этими результатами стоит большой совместный труд, участвовать в котором на приемлемых для предприятий ОПК условиях готов далеко не каждый вуз.

В процессе переговоров со стороны вузов довольно часто приходится слышать: «Предлагайте нашим выпускникам высокую зарплату, и вы решите свою кадровую проблему». В действительности, если говорить научно, то надо исходить из размера средней зарплаты по отрасли, для которой готовится специалист. Как это ни удивительно, но зарплаты для молодых специалистов в московском отделении фирмы Боинг и многих предприятиях ОПК практически одинаковы. При этом в одном из вузов Боингу созданы все условия для отбора лучших выпускников: компьютерные классы, курсы, тестирование... Очень полезный опыт, пример того, как цивилизованно должны строиться отношения вуза и предприятия с пользой для студентов.

Да, понятие высокой зарплаты для молодых специалистов существует и связано оно с работой в других отраслях, в частности в области информационных технологий (ИТ).

3. Организующая роль государства. Учитывая вышесказанное, приходится делать вывод, что без участия государства эффективности звена "вузы – предприятия ОПК" не достичь. Возможности поддержки

три: восстановление системы целевого распределения; создание экономических механизмов, развивающих партнёрство «вузы - предприятия ОПК»; принятие административных мер по организации целевой подготовки специалистов, формирующей у студентов стремление работать по специальности, повышать свои знания.

Смысл имеет весь этот комплекс задач, так как его результат становится осязаемым для Общества, поддаётся оценке и управлению. В результате возникнет заинтересованность вузов во взаимодействии с предприятиями ОПК, основанная на системных принципах. Системы с оплатой предприятиями ОПК вузам за «специально подготавливаемых студентов» вряд ли могут претендовать на эту роль, хотя бы потому, что даже первичный результат – молодой специалист, пришедший на предприятие – не гарантируется.

Результатом работы вуза с точки зрения Общества следует считать выпускника со знанием и навыками работы по специальности, стремящегося работать по специальности и имеющего всю необходимую информацию о предприятиях, где он может работать по специальности и совершенствовать своё мастерство; стремящегося к максимально глубокому, в том числе научному, освоению профессии. Очевидно, что для предприятий ОПК наиболее ценным приобретением являются выпускники, стремящиеся к глубоким познаниям в своей области в сочетании с практической работой.

Интерес к практической работе, возможности её совершенствования на основе получаемых теоретических знаний и самостоятельной научной работы должны прививаться студентам в процессе обучения в вузе. Важно также подтверждение этого подхода со стороны предприятий ОПК. Нередко при прохождении практики на предприятии или даже будучи принятым на предприятие по совместительству, студент не видит всех возможностей, которые могут сыграть важную роль при выборе им своего первого места постоянной работы. Уже на этапе производственной практики необходимо показывать все эти возможности.

4. Закрепление молодых специалистов. Обратимся к пирамиде Маслоу. Основание пирамиды – физиологические потребности человека. Следующий уровень – потребности в безопасности и защищённости. Затем – потребности в принадлежности социальной группе, причастности, поддержке. Выше – потребности в уважении и признании. Вершина пирамиды – потребность в самовыражении. Возможности для развития молодых специалистов предприятий ОПК удивительно точно соответствуют уровням пирамиды Маслоу даже в среднесрочной перспективе. Для молодых специалистов, как минимум, необходимо обеспечить возможность удовлетворения ими своих физиоло-

гических потребностей. Существующий средний уровень в аэрокосмической отрасли это обеспечивает. Следует ли поднимать планку в целях повышения количества молодых специалистов, принимаемых на работу? В работе [2] рекомендуется с осторожностью относиться даже к системам материального поощрения.

По словам первого вице-премьера С.Б.Иванова, дополнительно выделяемые деньги съедаются неконтролируемым ростом цен на военную продукцию. Определённая доля этого роста связана с затратами на молодых специалистов, которые не всегда окупаются. Предприятию целесообразно строить работу с молодыми специалистами на долгосрочную перспективу, в которой деньги занимают далеко не самую главную роль. Большее значение имеет содействие и поддержка в планировании карьеры. Анализ текучести среди молодых специалистов показывает, что для тех, кто подал заявление в аспирантуру, уже учится в аспирантуре предприятия или окончил её – цифры кардинально отличаются в лучшую сторону. Этот фактор действует! Для его использования важно привлечение сначала студента, а затем и молодого специалиста к работам в подразделении по техническому и научному направлению.

Использование знаний, получаемых студентом в вузе, а также их последующее развитие, во многом определяет эффективность специалиста. Предприятия ОПК обладают широким набором возможностей по развитию знаний. Перечислим основные. Обучение по программе вуза (если есть филиал). Производственная практика. Курсовые и дипломные работы. Конкурсы, конференции, публикации. Научно-исследовательские работы (НИР). Аттестация. Научные школы. Научный руководитель. Секции и НТС предприятия. Отдел подготовки и развития персонала. Аспирантура предприятия. Диссертационный совет. Рационализация и патенты. Закреплению молодого специалиста в подразделении может содействовать предоставление ему возможностей использования данной инфраструктуры для развития своих творческих способностей.

5. Основа резерва научных кадров. Судя по статистике, Аэрокосмический факультет является основным донором квалифицированных кадров «НПО машиностроения». Для закрепления молодых специалистов на предприятии разработана специальная программа. Она предусматривает как меры социально-экономического характера, так и меры обеспечения условий для творческого развития и научного роста выпускников университета. В частности, на предприятии созданы и развиваются научные школы, функционирует аспирантура и диссертационный совет. Это единственный в Москве и Московской области

совет, принимающий к защите диссертации по тематическому направлению «Крылатые ракеты». Политика предприятия направлена на привлечение молодёжи к научному творчеству, на повышение числа молодых кандидатов. Этим же целям служат ежегодные научно-технические конференции, проводимые на Аэрокосмическом факультете МГТУ им. Н.Э. Баумана при нашем предприятии.

Одним из результатов этой политики является то, что всё больше молодых специалистов стремится в аспирантуру. Многие задачи, решаемые специалистами предприятия, по уровню сложности соответствуют диссертационным работам. На сегодняшней конференции, например, будет представлен доклад по диссертационной работе Е.Г. Ватолиной. Научный руководитель работы доктор технических наук В.В.Горский отмечает научную ценность, а начальник отделения Ю.А. Прохорчик – практическую значимость выполненной работы, глубокие знания и талант, проявленные автором. Е.Г. Ватолина работает в одном из наиболее наукоёмких отделов предприятия (начальник отдела В.П. Котенёв), где каждый третий работник имеет учёную степень.

Здесь уже завершил диссертацию ещё один молодой работник отдела, выпускник Аэрокосмического факультета Д.А. Забарко. Готовятся новые диссертации. Недавно с успехом защитили кандидатские диссертации молодые специалисты, выпускники Аэрокосмического факультета С.М. Асатуров, супруги В.А. и Д.В. Сысенко. Завершил диссертационную работу другой выпускник этого факультета, директор Объединённой дирекции космических программ предприятия С.Э. Зайцев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Точилов Л.С., Крылов Е.С. Новые аспекты проблемы развития персонала аэрокосмического предприятия //XXVI Академические чтения по космонавтике, 2002г.
2. Элфи Кон Почему не работают системы поощрений // Сборник «Системы оплаты труда», серия Harvard Business Review, М.: Альпина Бизнес Букс, 2007г.

УДК 378

И.О. Эмри, Р.П. Симоньянц

СОВМЕСТНАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ БАУМАНСКОГО И ЛЮБЛЯНСКОГО УНИВЕРСИТЕТОВ В СФЕРЕ ОБРАЗОВАНИЯ И ИННОВАЦИЙ

Анализируется совместная деятельность МГТУ им. Н.Э. Баумана и Люблянского университета Словении в соответствии с Меморандумом от 16.12.2004. Обсуждаются перспективы расширения творческих отношений в связи с реализацией проекта развития и поддержки устойчивых инновационных технологий и созданием в Словении института iSIT.

1. Первые шаги сотрудничества. По предложению ректора МГТУ им. Н.Э. Баумана И.Б.Федорова между Бауманским университетом и Люблянским университетом (Словения) 16 декабря 2004 года в Любляне был подписан Меморандум о совместной деятельности, предусматривающий обмен учеными, аспирантами и студентами (стажировки) в целях выполнения научных исследований, представляющих взаимный интерес. Пионерами творческого содружества стали кафедра «Механика полимеров и композитов» (МРС) Люблянского университета и Аэрокосмический факультет (АК) Бауманского университета, возглавляемые авторами этого доклада соответственно.

На встречах в Москве и в Любляне обсуждались стратегические пути взаимодействия и возможные формы совместной работы. При этом учитывали преимущества и потенциальные возможности каждой из сторон. Словенские коллеги, например, признают высокий уровень научной подготовки студентов МГТУ им. Н.Э. Баумана и высоко оценивают реализуемую на факультете АК технологию подготовки инженеров с погружением в профессиональную среду (обучение студентов с непрерывной научной и производственной практикой). А в МГТУ высоко оценивают научные достижения и ту благоприятную правовую среду, в условиях которой ведет свои международные научно-технические разработки Люблянский университет [1].

В рамках Меморандума в 2005 году состоялись краткосрочные научные стажировки студентов Люблянского университета в Москве и студентов МГТУ в Словении. Пять словенских студентов обучались по программе «Исследование космоса: теория и практика» в Молодежном космическом центре МГТУ им. Н.Э. Баумана. Два студента Аэрокосмического факультета прошли научную стажировку в Центре Экспериментальной механики в Любляне. Итоги получили высокую оценку.

2. Перспективный план. В январе 2006 в МГТУ им. Н.Э. Баумана И. Эмри выступил с докладом о проекте развития и поддержки

устойчивых инновационных технологий, в котором предусматривалась интеграция усилий наших университетов и ряда других университетов и научных центров Европы. Доклад вызвал большой интерес. В целях обсуждения и развития идей проекта авторы настоящего доклада организовали серию деловых встреч и консультаций. В них приняли деятельное участие руководящие лица МГТУ им. Н.Э. Баумана, администрации г. Реутова, ФГУП «НПО машиностроения», а также Люблянского Университета, Академии Наук и Искусств Словении и ряда научных и промышленных организаций Словении. В результате широкого обсуждения концепция проекта, его основные положения, краткое изложение которых приведено ниже, получили полное одобрение.

Первым шагом по реализации идей проекта должна стать долгосрочная стажировка старшекурсников МГТУ в Словению. За время этой стажировки студенты должны выполнить и защитить проектно-исследовательскую работу по заданной тематике. Работой студентов будут руководить профессора как Люблянского университета, так и МГТУ им. Н.Э. Баумана. Выполненная ими работа должна, во-первых, представлять собой законченный продукт интеллектуальной деятельности и иметь инновационный характер. Во-вторых, индивидуальная составляющая работы каждого из участников должна удовлетворять требованиям, предъявляемым к дипломным работам в обоих университетах. Защиты индивидуальных квалификационных работ в составе общей работы по разрабатываемой проблеме будут проходить дважды: один раз в Любляне, второй – в Москве, на своей кафедре. Такая методически сложная задача требует серьезной предварительной подготовки и значительных усилий со стороны руководителей работы.

3. Реализация плана. Выполнив необходимую подготовку, Люблянский университет инициализировал первый шаг, направив соответствующее предложение в Москву. Ректор МГТУ им. Н.Э. Баумана И.Б. Федоров предложение поддержал. По приглашению Люблянского университета на годичную стажировку в Любляну МГТУ направляет трёх студентов дипломного курса. Двое из них – студенты факультета АК: Иван Сапрунов и Марина Гергесова. Третий – студент факультета «Специальное машиностроение (СМ)» Максим Шивохин.

И. Сапрунов проходит подготовку по специальности выпускающей кафедры ИУ-1 «Автоматические системы управления» факультета «Информатика и системы управления». В 2005 году он успешно прошел краткосрочную научную стажировку в Центре экспериментальной механики Люблянского университета [4]. М. Гергесова обучается по специальности выпускающей кафедры ФН-11 «Вычислительная математика и прикладная физика» факультета «Фундамен-

тальные науки». М. Шивохин обучается по направлению кафедры СМ-2 «Аэрокосмические системы». Такой состав направляемой группы студентов в набольшей степени отвечает требованиям технического задания по теме предстоящей проектно-исследовательской работы.

4. Люблянский проект. Проект развития и поддержки устойчивых инновационных технологий, который был доложен и обсуждался в Москве в январе 2006, в настоящее время находится в завершающей стадии. В соответствии с этим проектом в Словении создан Институт Устойчивых Инновационных Технологий («Institute for Sustainable Innovative Technologies» – iSIT [2]). Директором института iSIT был назначен И. Эмри. «Первой ласточкой» в работе iSIT должна стать группа студентов МГТУ им. Н.Э. Баумана как одного из ведущих технических университетов мира.

Рассмотрим концептуальные основы планируемой деятельности.

Цели: – Развитие наукоёмкой продукции и технологий, продвижение их с высокой добавленной стоимостью на международные рынки. – Формирование молодых высокообразованных предпринимательских команд, способных реализовать проекты по схеме «НИОКР – производство – маркетинг». – Дополнительная подготовка участников проекта – выпускников университетов и аспирантов.

Задачи: – Создание благоприятной среды для междисциплинарных взаимодействий исследователей, разработчиков проектов. – Обеспечение наилучших условий для реализации поставленных целей. – Заключение с участниками проектов контрактных соглашений, учитывающих имущественные и авторские права каждого. – Обеспечение гарантий полной юридической защиты авторов.

Ресурсы: Предполагается, что главными ресурсами проектов в перспективе будут идеи и исполнители ведущих университетов Центральной и Юго-восточной Европы. Этим обусловлена необходимость сотрудничества с передовыми университетами и, прежде всего, с МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Позиция: Институт iSIT, подобно AIST (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology AIST [3] – Национальный Институт Передовой Индустриальной Науки и Техники) в Японии, должен занять нишу между университетами и технопарками. Тем самым будет заполнен пробел между фундаментальными исследованиями и требованиями промышленности к продукции, представляющей собой результат проектной и научно-исследовательской деятельности.

Принцип функционирования iSIT [2]. Институт iSIT организован и зарегистрирован как Европейская экономическая группа долевого участия (European Interest Grouping – EEIG). Это – новое юридическое

образование, основанное на законах Европейского Сообщества, которыми облегчается и поощряется международное сотрудничество в научных исследованиях. Предусмотрено два вида деятельности Института: образовательная и предпринимательская.

6. Образовательная деятельность института iSIT реализуется поэтапно в форме научно-исследовательской стажировки.

Первый этап: – Формируется группа экспертов. Это исследователи-наставники из различных университетов, научных и промышленных организаций (местных, и зарубежных). – Разрабатывается тема и содержание проекта, нацеленного на создание изделия или технологии, которые превосходят существующие стандарты и должны привести к коммерческому успеху. – Определяется комплекс знаний, имеющих критическое значение для достижения целей проекта, и выполняется анализ требуемого состава разработчиков и наставников.

Второй этап: – Формируется группа разработчиков и наставников, которые, взаимодействуя по конкретным проблемам, решают проектные задачи. При этом каждый из участников имеет в виду, что конечной целью проекта является коммерческий успех. – Готовятся индивидуальные технические задания для каждого разработчика отдельно, в зависимости от уровня его образования и от содержания проекта.

Третий этап: – В ходе выполнения проекта изучаются дисциплины, перечень и объём которых согласуется с темой и содержанием проблемы. – Каждый разработчик выполняет программу обучения в своем университете, который присваивает ему соответствующую квалификацию с выдачей диплома. Кроме того, при завершении проекта студенты имеют возможность получить дополнительно ещё два диплома – дипломы двух европейских университетов, в которых они стажировались в ходе выполнения проекта.

6. Предпринимательская деятельность института iSIT предусмотрена в двух формах: – Долгосрочная научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа с промышленным партнером на основе договора. – Разработка новой конкретной идеи, совмещаемая с изложенным выше образовательным процессом.

Сущность предпринимательской деятельности в форме разработки новых идей заключается в следующем: – Институт iSIT интернационально открыт для любых предложений разработки научно-технических проектов по конкретным идеям, потенциально позволяющим достичь высокого коммерческого успеха. – С каждым заявителем (автором) Институт заключает контракт, который, прежде всего, гарантирует надежную юридическую защиту конфиденциальной информации, интеллектуальной собственности, авторских и имущест-

венных прав. – Каждое предложение затем изучается Международным советом опытных экспертов, которые определяют его научную, технологическую и рыночную ценность.

На основе этой оценки производится отбор предложений. Алгоритм последующих действий таков: – Автор успешно прошедшего отбор предложения подписывает контракт на выполнение в Институте научно-технической разработки, передавая Институту 70% его независимых прав, которые заканчиваются непосредственно после выполнения научных исследований и опытных разработок. Авторы идей получают, как правило, 30% всех независимых прав. Детали разделения интеллектуальных прав определены в уставе Института.

После отбора проектного предложения: – Формируется международная рабочая группа аспирантов и наставников, в которой участвуют и студенты. Они развивают идею до рыночного опытного образца или технологии. «Побочной продукцией» этой деятельности будут дипломные и магистерские работы, диссертации. – Созданный продукт (опытный образец или технология) снова подвергается потенциальной рыночной оценке. – Финансовые доли от реализации созданного продукта распределяются следующим образом: 20% имеет Институт iSIT; 30% – авторы идей и знаний (исследователи); 50% – инвесторы в пропорции с соответствующими долями инвестиционного капитала.

7. Заключение. Программа творческого сотрудничества между МГТУ им. Н.Э. Баумана и Люблянским университетом в соответствии Люблянским соглашением от 16.12.2004 успешно выполняется. Реализация проекта развития и поддержки устойчивых инновационных технологий, в соответствии с которым в Словении создан институт iSIT, открывает новые возможности расширения взаимовыгодных отношений между нашими университетами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. University of Ljubljana. www.uni-lj.si
2. Institute for Sustainable Innovative Technologies - iSIT : national industrial integrative research, development and educational centre/ [text Igor Emri and Urska Florjancic ; translation Mojca Japelj Muzic]. - Ljubljana : iSIT, 2007.
3. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology http://www.aist.go.jp/index_en.html
4. И.В. Сапрунов, научный руководитель И.О. Эмри. К проекту экспериментальной установки для исследования с помощью оптических средств и компьютера деформированного состояния образцов. Настоящий сборник.

УДК 378:62

G.Harih, S.Stankovic, S.Kozoderc, R.Hostnik, J.Pecnik, В.И. Майорова, А.В. Никонов, И.В. Сапрунов

СТУДЕНТЫ СЛОВЕНИИ – УЧАСТНИКИ МОСКОВСКОГО МЕЖДУНАРОДНОГО СЕМИНАРА ПО ИССЛЕДОВАНИЮ КОСМОСА

В рамках Меморандума о сотрудничестве между МГТУ им. Н.Э. Баумана и Люблянским Университетом (Словения) в 2005 году группа словенских студентов участвовала в работе международного научно-образовательного семинара. Анализируется работа семинара.

По приглашению Московского государственного технического университета (МГТУ) имени Н.Э. Баумана в международном научно-образовательном семинаре «Исследование космоса: теория и практика» (2 -12 июля 2005 г.), участвовала группа студентов Люблянского университета (Словения). Семинар проводился Молодежным Космическим Центром (МКЦ) МГТУ в подмосковном городе Королеве. В составе группы были: Harih Gregor, Stankovic Stas, Kozoderc Samo, Hostnik Rok, Pecnik Janez. Со студентами в работе семинара участвовал руководитель группы доцент Люблянского университета А.В. Никонов. Участники семинара были размещены в гостинице Института повышения квалификации работников ракетно-космической отрасли. Занятия и научные семинары проводились в аудиториях этого института. Организацию и управление работой семинара осуществляла руководитель МКЦ, доцент МГТУ им. Н.Э.Баумана В.И. Майорова.

В работе семинара принимали участие российские и иностранные студенты, профессора и специалисты аэрокосмической отрасли. Программа семинара была насыщена интересными мероприятиями: экскурсии на ведущие предприятия отрасли; встречи с космонавтами и крупными учёными, конструкторами; лекции специалистов аэрокосмической отрасли по актуальным направлениям науки и техники.

Большой объём полезной информации участники получили во время посещений музеев Ракетно-космической корпорации «Энергия» им. С.П. Королёва, Космического Центра им. М.В. Хруничева, музея Военно-воздушных сил России в г. Монино, М.О., Научно- производственного объединения «Звезда». Состоялись познавательные экскурсии в Учебно-экспериментальный Центр МГТУ им. Н.Э. Баумана в подмосковном посёлке Орево, в Центр управления полётами и в Центр подготовки космонавтов им. Ю.А. Гагарина.

Чрезвычайно интересными были встречи с космонавтами. Герой России Александр Юрьевич Калери рассказал о своём 145-дневном полёте на борту космического корабля «Союз ТМ» и орбитальной станции «Мир» в 1992 году. В этом полёте он совершил 2 выхода в открытый космос. В 1996 и 1997 годах он выполнил 199-дневный полёт. 4 апреля 2000 года А.Ю. Калери совершил свой третий космический полёт на космическом корабле «Союз ТМ-30» к станции «Мир». А с 18 октября 2003 по 29 апреля 2004 в четвёртый раз он летал в качестве бортинженера на Международную космическую станцию (МКС). Рассказ А. Ю. Калери дополнил космонавт России Александр Иванович Лазуткин. С 10 февраля по 14 августа 1997 года он летал на орбитальной станции «Мир».

Встречи с американскими астронавтами также были интересны и насыщены уникальной информацией. Астронавт НАСА, полковник США Jeffrey N. Williams поделился с участниками семинара своим космическим опытом. С 19 по 29 мая 2000 года он участвовал в полёте Шатла. Астронавт William Surles Mcarthur - участник космических экспедиций в 1993, в 1995 и 2000 годах. Он ставил на себе медицинские эксперименты в космическом полёте, проводил научно-технические эксперименты с космическим радиолокатором, участвовал в операции стыковки Шатла со станцией «Мир».

Словенские студенты испытывали особые чувства гордости за свою маленькую и прекрасную страну, общаясь с астронавтом НАСА, военно-морской летчицей США со словенскими корнями Sunita Lyn Williams. Её мать, Bonnie Pandya, - словенка. Sunita, как и остальные космонавты и астронавты, принявшие участие в работе семинара, в то время работала в Москве, в Центре подготовки космонавтов. Все они готовились к предстоящим полётам на МКС.

Как известно, эти полёты на МКС состоялись и прошли успешно. William Surles Mcarthur 30 сентября 2005 года в составе 12-ой космической экспедиции стартовал с Байконура на космическом корабле Союз и возвратился на Землю 8 августа 2006. Jeffrey N. Williams прилетел на МКС с космодрома Байконур 31 марта 2006 и работал бортинженером на орбите 6 месяцев. Sunita Lyn Williams работала на МКС бортинженером и установила мировой рекорд среди женщин, совершив 9 декабря 2006 года 4 выхода в открытый космос.

Много ценных знаний участники семинара получили на лекциях и практических занятиях. По дистанционному зондированию Земли из космоса занятия проводили специалисты российского Инженерно-технического центра «СканЭкс». На занятиях использовалось уникальное оборудование фирмы. На нём осуществлялись реальные экс-

перименты по оперативному приему и обработке космических снимков. Мобильная приемная станция «Унискан» была установлена рядом с корпусом института, где участники семинара и работали, и жили.

Одну из лекций по обработке фотоснимков, полученных с космического аппарата, прочёл крупнейший специалист в этой области, научный руководитель соответствующих работ на аэрокосмическом предприятии «НПО машиностроения» (г. Реутов) Алексей Николаевич Кочкин. Он изложил методические основы обработки космических фотоизображений, подкрепив теорию многочисленными примерами. После этой лекции со студентами Словении по их просьбе состоялась внеплановая тематическая беседа А.Н. Кочкина. Беседа проходила с участием студентов Аэрокосмического факультета Ивана Сапрунова, Андрея Вологжанина и декана Р.П. Симоньянца.

Во время беседы обсуждались также вопросы возможных направлений будущей совместной деятельности. Были рассмотрены некоторые варианты перспективных задач в области оценки природных ресурсов и окружающей среды на основе дистанционного зондирования Земли из космоса, которые могли бы быть инициированы студентами. Среди них - задачи, связанные с геологией и структурой недр, задачи изучения водных ресурсов, задачи мониторинга лесных ресурсов и растительного покрова, задачи анализа техногенных воздействий на окружающую среду. Для решения этих задач могут быть разработаны совместные студенческие проекты с привлечением заинтересованных организаций заказчиков и исполнителей.

Большое значение этого семинара состоит ещё и в том, что были собраны в одном месте и в одно время студенты разных стран, увлечённые новейшими научными идеями в области информационных и аэрокосмических технологий. Их общение укрепляет взаимопонимание и доверие. Без этого невозможно развивать международное сотрудничество и отечественную экономику.

Словенские участники семинара дали высокую оценку культурной программе. Она включала и Большой театр России, и Кремль, и Всероссийский выставочный центр, и Третьяковскую галерею, и прогулки по Москве. Навсегда запомнилось, например, воскресенье 10 июля. В этот замечательный летний день состоялась прогулка на теплоходе по реке Москва. Студенты отдыхали и общались с коллегами. В живописном месте на берегу водохранилища устроили пикник.

Вернувшись в Словению, студенты Люблянского университета по итогам поездки в Москву сделали несколько докладов на многолюдных презентациях. Материалы докладов опубликованы в прессе.

УДК 629.7.06

А.Е. Новиков, М.Ю. Иванов

АНАЛИЗ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМЫ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ НА ЗАДАННОЙ ТРАЕКТОРИИ ПОЛЕТА

Разработана методика анализа работоспособности топливной системы на заданной траектории полета изделия. Алгоритм выработки топлива из отсеков топливного бака формируется с учетом его конструктивных особенностей. Полученные результаты согласуются с опытными данными.

1. Введение. Условия эксплуатации крылатых ракет определяют задачи по обеспечению безотказной работы всех узлов и агрегатов изделия, в частности, подсистем комбинированной пневмогидравлической системы (КПГС). Система топливоподачи, входящая в состав КПГС, обеспечивает работу маршевого двигателя (МД) изделия. Штатная работа системы предполагает бесперебойную подачу топлива в МД без газовых включений. При этом до настоящего времени оставался открытым вопрос о том, какая именно траектория движения изделия окажется непригодной с точки зрения обеспечения сплошности потока топлива в МД. В данной работе предложена методика анализа работоспособности топливной системы на заданной траектории полета изделия.

Предлагаемая методика состоит из двух этапов: конструкторского и программного. В свою очередь программный этап подразделяется на этап оцифровки моделей и расчетный этап.

На конструкторском этапе создаются 3D-модели отсеков топливного бака (ТБ) изделия в одной из CAD-систем, например, SolidWorks ([1]). Оцифровка моделей программного этапа предполагает создание конечно-элементной сетки жидкостного объема каждого отсека с учетом заборных устройств (ЗУ). Результатом данного этапа являются файлы, содержащие информацию о номерах узлов конечных элементов в глобальной нумерации узлов, координатах узлов во введенной системе координат, типе ЗУ. В настоящей работе применялся сеточный генератор Ansys ICEM CFD ([3]), на вход которого поступали файлы 3D-моделей отсеков в формате IGES, и CAE-система StarCD,

в которой выполнялись заключительные операции для создания указанных файлов.

Расчетный этап включает в себя следующие положения: 1) загрузка исходных данных (массового расхода топлива из ТБ, величины перегрузок, действующих на изделие по траектории полета); 2) загрузка цифровых моделей отсеков; 3) алгоритм определения невырабатываемых остатков топлива в отсеках ТБ; 4) алгоритм выработки топлива из отсеков ТБ.

2. Алгоритм определения невырабатываемых остатков топлива в отсеках состоит в следующем. Записываются условия функционирования ЗУ и определяются так называемые активные точки, т.е. те точки, через которые в данный момент времени проходит плоскость зеркала жидкости (топлива)

$$\alpha = \left\{ P(x,y,z) \,|\, (x,y,z) \in \mathbb{R}^3, P \in V^j, P \notin V_Г^j, P \notin V_Ж^j \right\},$$

V^j – объем j-го отсека ТБ, для которого $V^j = V_Г^j + V_Ж^j$, где $V_Г^j$ – часть объема j-го отсека ТБ, занятая газом, $V_Ж^j$ – часть объема j-го отсека ТБ, занятая жидкостью, $j = \overline{1,q}$, где q – число отсеков ТБ. Если конструкция ТБ предусматривает наличие капиллярных заборных устройств (КЗУ), то вычисляется высота удерживаемого столба жидкости h по формуле

$$h = \left(4\sigma \cos\theta / d_{экв} - \xi \rho_T W^2/2\right) \Big/ \left(\rho_T g \left\|\bar{n}_\Sigma\right\|\right),$$

где ρ_T – плотность топлива, $кг/см^3$; g – ускорение свободного падения, $м/с^2$; $\left\|\bar{n}_\Sigma\right\|$ – длина суммарного вектора перегрузки $\bar{n}_\Sigma$, для которой $\left\|\bar{n}_\Sigma\right\| = \sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}$; σ – коэффициент поверхностного натяжения; θ – краевой угол смачивания; $d_{экв}$ – эквивалентный диаметр капиллярного фазового разделителя КЗУ, м; ξ – коэффициент гидравлического сопротивления; W – скорость потока, м/с.

3. Признак принадлежности. Каждому конечному элементу (КЭ), входящему в цифровую модель отсека ТБ, присваивается признак, указывающий на принадлежность данного КЭ к соответствующей области: газовой (г) или жидкой (ж). При этом возможна промежуточная ситуация: КЭ пересекает плоскость зеркала жидкости и, таким образом, оказывается принадлежащим как газу, так и жидкости. Опишем процедуру выдачи такого признака.

Пусть задан единичный вектор $\overline{n}_\Sigma$ и определены радиус-векторы $\overline{r}_j$, $j=\overline{1,q}$, точек N_j, лежащих на плоскости α в j-ом отсеке ТБ. Анализируется положение каждого узла N_k, $k\in\mathbb{N}$, КЭ относительно плоскости α. Вычисляются скалярные произведения $\omega_j=\overline{n}_\Sigma\cdot\overline{r}_j$. Тогда возможны три случая: 1) плоскость α не проходит через начало ОСК, связанной с изделием, и вектора $\overline{r}_j$ и $\overline{n}_\Sigma$ сонаправлены (рис. 1), т.е. скалярное произведение $\omega_j>0$; 2) плоскость α не проходит через начало О СК, связанной с изделием, и вектора $\overline{r}_j$ и $\overline{n}_\Sigma$ противоположно направлены (рис. 2), т.е. $\omega_j<0$; 3) плоскость α проходит через начало О СК, связанной с изделием, следовательно, вектора $\overline{r}_j$ и $\overline{n}_\Sigma$ ортогональны (рис. 3), т.е. $\omega_j=0$.

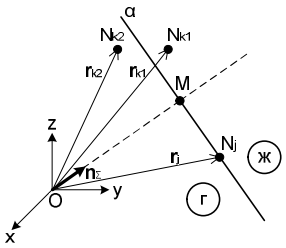


Рис. 1.

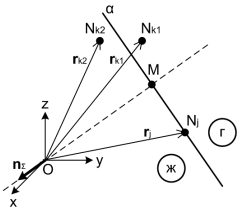


Рис. 2.

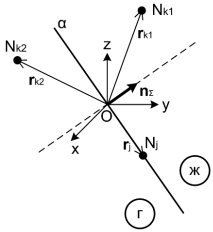


Рис. 3.

4. Логика вычислений величины $\left|\omega_j\right|$, $\operatorname{sgn}\left(\omega_j\right)=\omega_j\big/\left|\omega_j\right|$ и $ON_k=\left|\overline{n}_\Sigma\cdot\overline{r}_k\right|$, $\operatorname{sgn}\left(N_k\right)=\left(\overline{n}_\Sigma\cdot\overline{r}_k\right)\big/ON_k$.

Случай 1): $\omega_j>0$. Если $ON_k>\omega_j$, то

$$\begin{cases}\text{если } \operatorname{sgn}\left(N_k\right)=1, \text{ то } N_k\in V_{Ж}^{j};\\ \text{если } \operatorname{sgn}\left(N_k\right)=-1, \text{ то } N_k\in V_{Г}^{j};\end{cases}$$

если $ON_k<\omega_j$, то $N_k\in V_{Г}^{j}$; если $ON_k=\omega_j$, то $N_k\in\alpha$.

Случай 2): $\omega_j<0$. Если $ON_k>\left|\omega_j\right|$, то

$$\begin{cases} \text{если } \operatorname{sgn}(N_k) = 1, \text{ то } N_k \in V_{ж}^{j}; \\ \text{если } \operatorname{sgn}(N_k) = -1, \text{ то } N_k \in V_{г}^{j}; \end{cases}$$

если $ON_k < |\omega_j|$, то $N_k \in V_{ж}^{j}$; если $ON_k = |\omega_j|$, то $N_k \in \alpha$.

Случай 3): $\omega_j = 0$. Если $ON_k \neq 0$, то

$$\begin{cases} \text{если } \operatorname{sgn}(N_k) = 1, \text{ то } N_k \in V_{ж}^{j}; \\ \text{если } \operatorname{sgn}(N_k) = -1, \text{ то } N_k \in V_{г}^{j}; \end{cases}$$

если $ON_k = 0$, то $N_k \in \alpha$ ..

Узлу N_k присваивается признак, указывающий на его положение относительно плоскости α . На основании анализа признаков всех узлов КЭ делается вывод о принадлежности данного КЭ к соответствующей области. Путем суммирования объемов КЭ, принадлежащих областям $V_{ж}^{j}$, вычисляются минимальные остатки незабора топлива в каждом отсеке ТБ.

5. Выводы. Алгоритм выработки топлива из отсеков ТБ формируется с учетом конструктивных особенностей рассматриваемого ТБ.

Предложенная методика апробирована на изделии НПО машиностроения. Полученные результаты согласуются с имеющимися опытными данными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тику Ш. Эффективная работа: SolidWorks 2004. – СПб.: Питер, 2005. – 768 с.; ил.
2. Д.В. Сивухин. Термодинамика и молекулярная физика: Учеб. пособие для вузов. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. – 592 с.
3. Инженерно-технический журнал «ANSYS Solutions. Русская редакция», № 1, 2005.

УДК 539.3 (075.8)

Ю.И. Клюев

СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ СИСТЕМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ В КАНОНИЧЕСКОЙ ФОРМЕ ДЛЯ ЗАДАЧ СТАТИКИ И ДИНАМИКИ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Получены разрешающие дифференциальные уравнения для многослойной оболочки. Материал каждого слоя рассматривается как ортотропный.. Система дифференциальных уравнений для k -той гармоники приведена к канонической форме.

1. Введение. Известно, что для численного решения задач статики и динамики упругих конструкций, состоящих из набора балок, колец, пластин и оболочек различной геометрии, используются системы дифференциальных уравнений в канонической форме. Для оболочек вращения, рассматриваемых в рамках гипотезы Кирхгофа-Лява, такие уравнения в аналитической форме приведены в [1]. Для многослойных оболочек из ортотропных слоев, получить уравнения в аналитическом виде не удается.

В работе [2] на основе использования неопределенных множителей Лагранжа построен алгоритм получения разрешающих дифференциальных уравнений для многослойной оболочки. При этом материал всего многослойного пакета рассматривается как ортотропный.

В настоящей работе материал каждого слоя рассматривается как ортотропный. Считается, что оси упругой симметрии слоев не совпадают с глобальными осями упругой симметрии для пакета в целом, поэтому материал оболочки рассматривается как материал с одной плоскостью упругой симметрии.

2. Вывод уравнений. С учетом этого запишем уравнения деформаций для оболочек вращения в виде [2]

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{H}_1\mathbf{V} + \mathbf{H}_2\frac{\partial}{\partial\varphi}\mathbf{V} + \mathbf{H}_3\frac{\partial}{\partial s}\mathbf{V}, \qquad (1)$$

где $\varepsilon = \left[\varepsilon_1 \;\; \varepsilon_2 \;\; \varepsilon_{12} \;\; \varepsilon_{21} \;\; \chi_1 \;\; \chi_2 \;\; \chi_{12} \;\; \chi_{21} \;\; \psi_1 \;\; \psi_2\right]^T$ – вектор деформаций;

$\mathbf{V} = \left[v_1 \;\; v_2 \;\; w \;\; \theta_1 \;\; \theta_2\right]^T$ – вектор перемещений; матрицы $\mathbf{H}_1$, $\mathbf{H}_2$ и $\mathbf{H}_3$ размера (10×5) имеют следующие ненулевые элементы:

для $\mathbf{H}_1$: $h_{1,3} = k_1$; $h_{2,1} = h_{6,4} = \varphi_{21}$; $h_{2,3} = k_2$; $h_{9,1} = -k_1$; $h_{9,4} = h_{10,5} = 1$;

$h_{10,2} = -k_2$; $\varphi_{21} = r^{-1}\cos\gamma$; $k_2 = r^{-1}\sin\gamma$;

для $\mathbf{H}_2$: $h_{2,2} = h_{4,1} = h_{6,5} = h_{8,4} = h_{10,3} = r^{-1}$;

для $\mathbf{H}_3$: $h_{1,1} = h_{3,2} = h_{5,4} = h_{7,5} = h_{9,3} = 1$.

Интегральные по толщине соотношения упругости запишем для внутренних силовых факторов, действующих на площадках, перпендикулярных s и φ

$$\mathbf{P} = \mathbf{F}\boldsymbol{\varepsilon}, \qquad \mathbf{P}_V = \mathbf{G}\boldsymbol{\varepsilon}, \tag{2}$$

где $\mathbf{P} = \begin{bmatrix} rT_1 & rT_{12} & rQ_1 & rM_1 & rM_{12} \end{bmatrix}^T$;

$\mathbf{P}_V = \begin{bmatrix} T_2 & T_{21} & Q_2 & M_2 & M_{21} \end{bmatrix}^T$;

$\mathbf{F} = r\begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 & \mathbf{C}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{K}_1 \\ \mathbf{C}_1 & \mathbf{D}_1 & 0 \end{bmatrix}$; $\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_2 & \mathbf{C}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{K}_2 \\ \mathbf{C}_2 & \mathbf{D}_2 & 0 \end{bmatrix}$.

Матрицы $\mathbf{B}_1 \div \mathbf{D}_2$ получены из соотношений

$$\mathbf{B} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \mathbf{f}_\varepsilon^T \mathbf{C}_\varepsilon \mathbf{f}_\varepsilon \frac{H_1 H_2}{r} dz; \quad \mathbf{C} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \mathbf{f}_\varepsilon^T \mathbf{C}_\varepsilon \mathbf{f}_\varepsilon z \frac{H_1 H_2}{r} dz; \quad \mathbf{D} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \mathbf{f}_\varepsilon^T \mathbf{C}_\varepsilon \mathbf{f}_\varepsilon z^2 \frac{H_1 H_2}{r} dz,$$

где $\mathbf{C}_\varepsilon = \begin{bmatrix} E_1(1-\nu_{12}\nu_{21}) & E_1\nu_{21}(1-\nu_{12}\nu_{21}) & 0 \\ E_2\nu_{21}(1-\nu_{12}\nu_{21}) & E_2(1-\nu_{12}\nu_{21}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$; $\mathbf{f}_\varepsilon = \begin{bmatrix} H_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & H_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_{11} & H_{22} \end{bmatrix}$;

$H_{11} = H_1^{-1}$; $H_{22} = r \cdot H_2^{-1}$; $E_1, E_2, G_{12}, \nu_{12}, \nu_{21}$ – характеристики одного ортотропного слоя.

Уравнения равновесия представим в виде

$$\frac{\partial}{\partial s}\mathbf{P} = \mathbf{R}_1\mathbf{P} + \mathbf{R}_2\mathbf{P}_V + \mathbf{R}_3\frac{\partial}{\partial \varphi}\mathbf{P}_V - \mathbf{p}_S, \tag{3}$$

где матрицы $\mathbf{R}_1$, $\mathbf{R}_2$, $\mathbf{R}_3$ имеют размер (5 × 5), их ненулевые элементы имеют следующий вид:

для $\mathbf{R}_1$: $r_{1,3} = -k_1$; $r_{3,1} = k_1$; $r_{4,3} = 1$; для $\mathbf{R}_2$: $r_{1,1} = r_{4,4} = \cos\gamma$;

$r_{2,2} = r_{5,5} = -\cos\gamma$; $r_{2,3} = -\sin\gamma$; $r_{3,1} = \sin\gamma$; $r_{5,3} = r$;

для $\mathbf{R}_3$: $r_{1,2} = r_{2,1} = r_{3,3} = r_{4,5} = r_{5,4} = -1$.

На основании (1), (2) установим связь внутренних силовых факторов с перемещениями и их производными.

$$\mathbf{P} = \mathbf{A}_1\mathbf{V} + \mathbf{A}_2\frac{\partial}{\partial \varphi}\mathbf{V} + \mathbf{A}_3\frac{\partial}{\partial s}\mathbf{V}; \tag{4}$$

$$\mathbf{P}_V = \mathbf{S}_1\mathbf{V} + \mathbf{S}_2\frac{\partial}{\partial \varphi}\mathbf{V} + \mathbf{S}_3\frac{\partial}{\partial s}\mathbf{V}, \tag{5}$$

где $\mathbf{A}_1 = \mathbf{F}\cdot\mathbf{H}_1$; $\mathbf{A}_2 = \mathbf{F}\cdot\mathbf{H}_2$; $\mathbf{A}_3 = \mathbf{F}\cdot\mathbf{H}_3$; $\mathbf{S}_1 = \mathbf{G}\cdot\mathbf{H}_1$; $\mathbf{S}_2 = \mathbf{G}\cdot\mathbf{H}_2$; $\mathbf{S}_3 = \mathbf{G}\cdot\mathbf{H}_3$.

Из (4) имеем: $$\frac{\partial}{\partial s}\mathbf{V} = \boldsymbol{\alpha}_1\mathbf{V} + \boldsymbol{\alpha}_2\frac{\partial}{\partial\varphi}\mathbf{V} + \boldsymbol{\alpha}_3\mathbf{P}, \qquad (6)$$

где $$\boldsymbol{\alpha}_1 = -\mathbf{A}_3^{-1}\cdot\mathbf{A}_1; \quad \boldsymbol{\alpha}_2 = -\mathbf{A}_3^{-1}\cdot\mathbf{A}_2; \quad \boldsymbol{\alpha}_3 = \mathbf{A}_3^{-1}. \qquad (7)$$

Подстановка (7) в (5) позволяет выразить $\mathbf{P}_V$ через перемещения и силовые факторы

$$\mathbf{P}_V = \boldsymbol{\beta}_1\mathbf{V} + \boldsymbol{\beta}_2\frac{\partial}{\partial\varphi}\mathbf{V} + \boldsymbol{\beta}_3\mathbf{P}, \qquad (8)$$

где $\boldsymbol{\beta}_1 = \mathbf{S}_1 + \mathbf{S}_3\cdot\boldsymbol{\alpha}_1$; $\boldsymbol{\beta}_2 = \mathbf{S}_2 + \mathbf{S}_3\cdot\boldsymbol{\alpha}_2$; $\boldsymbol{\beta}_3 = \mathbf{S}_3\cdot\boldsymbol{\alpha}_3$. (9)

Из уравнений равновесия (3) и (8) получаем

$$\frac{\partial}{\partial s}\mathbf{P} = \boldsymbol{\gamma}_1\mathbf{V} + \boldsymbol{\gamma}_2\frac{\partial}{\partial\varphi}\mathbf{V} + \boldsymbol{\gamma}_3\frac{\partial^2}{\partial\varphi^2}\mathbf{V} + \boldsymbol{\gamma}_4\mathbf{P} + \boldsymbol{\gamma}_5\frac{\partial}{\partial\varphi}\mathbf{P} - \mathbf{p}_S. \qquad (10)$$

Таким образом, получено два уравнения (6), (10), разрешенные относительно первых производных по s от вектора состояния $\mathbf{Y}(s,\varphi) = \left[\mathbf{V}^T(s,\varphi) \quad \mathbf{P}^T(s,\varphi)\right]^T$.

3. Каноническая форма. Рассмотрим алгоритм получения уравнений в канонической форме для k-той гармоники разложения в ряд Фурье по окружной координате φ. Для замкнутых оболочек вращения справедливо разложение в ряд Фурье перемещений, внутренних силовых факторов и внешних нагрузок

$$\mathbf{V}(s,\varphi) = \sum_{k=0}^{\infty}\left[\mathbf{S}_k^{(C)}(\varphi)\cdot\mathbf{V}_k^{(C)}(s) + \mathbf{S}_k^{(S)}(\varphi)\cdot\mathbf{V}_k^{(S)}(s)\right], (\mathbf{P},\mathbf{p}_S), \qquad (11)$$

где $\mathbf{S}_k^{(C)} = diag\left[\cos k\varphi \quad \sin k\varphi \quad \cos k\varphi \quad \cos k\varphi \quad \sin k\varphi\right]$;

$\mathbf{S}_k^{(S)} = diag\left[\sin k\varphi \quad -\cos k\varphi \quad \sin k\varphi \quad \sin k\varphi \quad -\cos k\varphi\right]$.

Для k-той гармоники имеем

$$\mathbf{V}_k(s,\varphi) = \mathbf{S}_k^{(C)}(\varphi)\cdot\mathbf{V}_k^{(C)}(s) + \mathbf{S}_k^{(S)}(\varphi)\cdot\mathbf{V}_k^{(S)}(s), \ (\mathbf{P},\mathbf{p}_S). \qquad (12)$$

Вычислим первую и вторую производные по φ от

$$\mathbf{S}_k^{(C)}(\varphi), \frac{\partial}{\partial\varphi}\mathbf{S}_k^{(C)} = -k\mathbf{S}_k^{(S)} \text{ и } \mathbf{S}_k^{(S)}(\varphi); \ \frac{\partial}{\partial\varphi}\mathbf{S}_k^{(S)} = k\mathbf{S}_k^{(C)}; \quad \frac{\partial^2}{\partial\varphi^2}\mathbf{S}_k^{(C)} = -k^2\mathbf{S}_k^{(C)};$$

$$\frac{\partial^2}{\partial\varphi^2}\mathbf{S}_k^{(S)} = -k^2\mathbf{S}_k^{(S)}. \qquad (13)$$

Представим матрицы, входящие в (6) и (10), в виде суммы. Для произвольной матрицы

$$\mathbf{D}=\mathbf{D}_1+\mathbf{D}_2=\begin{bmatrix} d_{11} & 0 & d_{13} & d_{14} & 0 \\ 0 & d_{22} & 0 & 0 & d_{25} \\ d_{31} & 0 & d_{33} & d_{34} & 0 \\ d_{41} & 0 & d_{43} & d_{44} & 0 \\ 0 & d_{52} & 0 & 0 & d_{55} \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} 0 & d_{12} & 0 & 0 & d_{15} \\ d_{21} & 0 & d_{23} & d_{24} & 0 \\ 0 & d_{32} & 0 & 0 & d_{35} \\ 0 & d_{42} & 0 & 0 & d_{45} \\ d_{51} & 0 & d_{53} & d_{54} & 0 \end{bmatrix}.$$

На основании (12) и (13) приходим к соотношениям

$$\mathbf{D}\mathbf{V}_k(s,\varphi)=\mathbf{S}_k^{(C)}\left(\mathbf{D}_1\mathbf{V}_k^{(C)}+\mathbf{D}_2\mathbf{V}_k^{(S)}\right)+\mathbf{S}_k^{(S)}\left(-\mathbf{D}_2\mathbf{V}_k^{(C)}+\mathbf{D}_1\mathbf{V}_k^{(S)}\right),\ (\mathbf{P}); \qquad (14)$$

$$\mathbf{D}\frac{\partial}{\partial\varphi}\mathbf{V}_k(s,\varphi)=\mathbf{S}_k^{(C)}\left(-k\mathbf{D}_2\mathbf{V}_k^{(C)}+k\mathbf{D}_1\mathbf{V}_k^{(S)}\right)+\mathbf{S}_k^{(S)}\left(-k\mathbf{D}_1\mathbf{V}_k^{(C)}-k\mathbf{D}_2\mathbf{V}_k^{(S)}\right),\ (\mathbf{P}); \qquad (15)$$

$$\mathbf{D}\frac{\partial^2}{\partial\varphi^2}\mathbf{V}_k(s,\varphi)=\mathbf{S}_k^{(C)}\left(-k^2\mathbf{D}_1\mathbf{V}_k^{(C)}-k^2\mathbf{D}_2\mathbf{V}_k^{(S)}\right)+,(\mathbf{P}) \qquad (16)$$

$$+\mathbf{S}_k^{(S)}\left(k^2\mathbf{D}_2\mathbf{V}_k^{(C)}-k^2\mathbf{D}_1\mathbf{V}_k^{(S)}\right),$$

Используя соотношения (14-16), понимая под матрицей $\mathbf{D}$ матрицы, входящие в уравнения (6) и (10), находим

$$\frac{\partial}{\partial s}\begin{bmatrix}\mathbf{V}_k^{(C)}\\ \mathbf{V}_k^{(S)}\\ \mathbf{P}_k^{(C)}\\ \mathbf{P}_k^{(S)}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12}\\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathbf{V}_k^{(C)}\\ \mathbf{V}_k^{(S)}\\ \mathbf{P}_k^{(C)}\\ \mathbf{P}_k^{(S)}\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}0\\ 0\\ \mathbf{p}_S^{(C)}\\ \mathbf{p}_S^{(S)}\end{bmatrix}. \qquad (17)$$

4.Выводы. Получена система дифференциальных уравнений для k-той гармоники. Для системы (17) соблюдены условия, полученные в [2]: $\mathbf{A}_{11}=-\mathbf{A}_{22}^T$; $\mathbf{A}_{12}$, $\mathbf{A}_{21}$ – симметричны относительно своих главных диагоналей. Разрешающая система дифференциальных уравнений (17) имеет 20-й порядок.

Если материал ортотропный, полученная система уравнений распадается на две независимые системы относительно $\mathbf{V}_k^{(C)},\mathbf{P}_k^{(C)}$ и $\mathbf{V}_k^{(S)},\mathbf{P}_k^{(S)}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бидерман В.Л. Механика тонкостенных конструкций. Статика. – М.: Машиностроение, 1977. – 488 с.
2. Попов Б.Г. Расчет многослойных конструкций вариационно-матричными методами: Учебное пособие. М.: Изд-во МГТУ, 1993. –294с.

УДК 629.78

А.П. Севрюков, Р.П. Симоньянц

РАСЧЕТ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА ТЯГИ

Определяется эксцентриситет вектора тяги реактивного двигателя, обусловленный отклонениями геометрических и массовых характеристик конструкции КЛА. Предложена концепция методики расчёта, упрощённый вариант которой реализован в системе компьютерной математики (СКМ) Mathcad.

1. Введение. Эксцентриситет вектора тяги e – кратчайшее расстояние от центра масс космического летательного аппарата (КЛА) до линии направления тяги двигательной установки. Этим совокупным параметром комплексно оценивается влияние возможных отклонений от номинальных значений геометрических и массовых характеристик конструкции КЛА и его элементов. Отклонения эти обусловлены множеством факторов. Во-первых, они связаны с изменениями в распределении масс в полёте и с трансформациями корпуса и его элементов. Во-вторых, они возникают из-за упругих деформаций, неточности изготовления и сборки конструкции КЛА, его узлов, агрегатов и двигательной установки. В значительной мере они вызваны несовершенством методов контроля в процессе производства КЛА.

Возникающий от эксцентриситета вектора тяги возмущающий момент оказывает сильное влияние на динамику движения аппарата относительно центра масс. С его увеличением растет расход топлива на угловую стабилизацию и частота включений исполнительных органов, снижается точность стабилизации. Этим обусловлены жесткие требования, которые предъявляются к конструкции и компоновке КЛА на всех этапах проектирования для обеспечения минимальных значений эксцентриситета e.

При проектировании конструкции КЛА и выполнении его компоновочной схемы необходимо иметь методический инструмент, позволяющий оперативно рассчитывать величину e, оценивать влияние на неё различных параметров и проектно-конструкторских решений. Таким инструментом должна стать соответствующая математическая модель. Разработка концепции такой модели – цель настоящей работы.

Исходим из того, что отклонения параметров системы от проектных значений имеют как детерминированный, так и случайный характер. В концептуальном рассмотрении используем детерминированный подход. А случайный разброс параметров предполагается учиты-

вать при формировании входных данных, определяющих области возможных отклонений входящих в модель параметров, или методом статистических испытаний с помощью этой модели. Для расчёта могут быть использованы современные компьютерные технологии, например система компьютерной математики (СКМ) Mathcad.

2. Формирование входных данных. Входные данные разделяем на две группы: группа номинальных значений и группа возможных отклонений. Ввод осуществляем по шагам. *Первый шаг*: вводим основную систему координат 0*XYZ* (ОСК – связанные с корпусом КЛА прямоугольные оси, называемые строительными). *Второй шаг*: вводим группу номинальных векторов: $\overline{r_{цм}}(X_{цм},Y_{цм},Z_{цм})$ – радиус-вектор центра масс (ЦМ) КЛА; $\overline{r_p}(X_p,Y_p,Z_p)$ – радиус-вектор точки приложения тяги; $\overline{P}(P_X,P_Y,P_Z)$ – сам вектор тяги. *Третий шаг*: вводим области возможных значений $\Delta_i, i=\overline{1,n}$ координат ЦМ, координат точки приложения тяги и параметров самого вектора тяги.

Области возможных значений Δ_i задаём границами множеств тех значений, которые в процессе функционирования КЛА могут принимать рассматриваемые величины с учетом технологических допусков и ошибок располагаемой информации. Области Δ_i формируем так, чтобы они содержали только возможные значения варьируемых величин. Для этого анализируем имеющиеся данные о конструкции и учитываем условия, вытекающие из программы полёта. Выявляем ограничения и требования, предъявляемые системой управления. Учитываем влияние вероятностных факторов, воспользовавшись опытом уже существующих систем и инженерной интуицией.

Возможные значения вектора тяги образуют непрерывное множество. Полагаем условно, что область возможной ориентации вектора тяги – сектор шара с центром в точке крепления двигателя. Области расположения центра масс (ЦМ) и точки приложения вектора тяги принимаем в форме прямоугольного параллелепипеда.

2. Задание множеств векторов можно ввести при помощи вспомогательной линейной функции безразмерной переменной α, которая принимает все возможные значения в рассматриваемом интервале. В общем виде её запишем так:

$$f(\alpha) = +\Delta_0 \cdot \alpha + (1-\alpha)\cdot(-\Delta_1)\ ,\ 0 \le \alpha \le 1, \qquad (1)$$

где $+\Delta_0, -\Delta_1$ – границы соответствующей области возможных отклонений (рис.1). Тогда вектор-функцию положения центра масс запишем в виде

$$\overline{r_{цм}}(\alpha_X^{цм},\alpha_Y^{цм},\alpha_Z^{цм}) = \begin{bmatrix} X_{цм} + \left[\Delta X_{0цм}\cdot\alpha_X^{цм} + (1-\alpha_X^{цм})\cdot(-\Delta X_{1цм})\right] \\ Y_{цм} + \left[(\Delta Y_{0цм}\cdot\alpha_Y^{цм} + (1-\alpha_Y^{цм})\cdot(-\Delta Y_{1цм})\right] \\ Z_{цм} + \left[(\Delta Z_{0цм}\cdot\alpha_Z^{цм} + (1-\alpha_Z^{цм})\cdot(-\Delta Z_{1цм})\right] \end{bmatrix}. \quad (2)$$

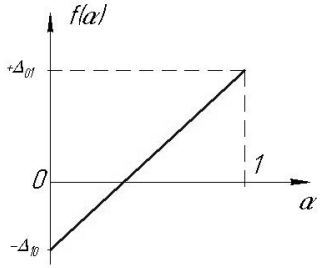


Рис. 1. Вспомогательная функция

Аналогично записывается и вектор-функция точки приложения тяги относительно начала связанной системы координат

$$\overline{r_p}\left(X_P, Y_P, Z_P\right) = \overline{r_p}\left(X_P\left(\alpha_X^P\right), Y_P\left(\alpha_Y^P\right), Z_P\left(\alpha_Z^P\right)\right). \quad (3)$$

3. Расчет радиус-вектора точки приложения тяги относительно центра масс выполняем по правилу вычитания векторов (3) и (2):

$$\Delta\overline{r}(\alpha_X^P,\alpha_Y^P,\alpha_Z^P,\alpha_X^{цм},\alpha_Y^{цм},\alpha_Z^{цм}) = \overline{r_P}(\alpha_X^P,\alpha_Y^P,\alpha_Z^P) - \overline{r_{цм}}(\alpha_X^{цм},\alpha_Y^{цм},\alpha_Z^{цм}). \quad (4)$$

Вектор этот задан шестью переменными. В ряде случаев его можно упростить, сократив количество переменных до трех. Тогда искомый вектор принимает вид:

$$\Delta\overline{r}(\alpha_X,\alpha_Y,\alpha_Z) = \overline{r_p} - \overline{r_{oi}} + \begin{bmatrix} \Delta X_1\cdot\alpha_X + (1-\alpha_X)\cdot(-\Delta X_0) \\ \Delta Y_1\cdot\alpha_Y + (1-\alpha_Y)\cdot(-\Delta Y_0) \\ \Delta Z_1\cdot\alpha_Z + (1-\alpha_Z)\cdot(-\Delta Z_0) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $\Delta X = \Delta X_P + \Delta X_{цм}$, $\Delta Y = \Delta Y_P + \Delta Y_{цм}$, $\Delta Z = \Delta Z_P + \Delta Z_{цм}$.

4. Расчет эксцентриситета. Истинное направление вектора тяги $\overline{P}$ относительно строительных осей (ОСК) определяется двумя углами: ε и ν [2]. Угол ε, называемый углом перекоса тяги, лежит в плоскости, содержащей в себе вектор $\overline{P}$, и осью $0X$. Угол ν определяет положение проекции $P\sin\varepsilon$ в плоскости $Y0Z$. Составляющие тяги по осям ОСК при этом равны:

$$P_X = P\cos\varepsilon, \quad P_Y = P\sin\varepsilon\cos\nu, \quad P_Z = P\sin\varepsilon\sin\nu.$$

Проекции на оси ОСК зададим с помощью функции (1):

$$P_I\ (\alpha_I^{or.P}) = R \cdot \alpha_I^{or.P} + (1 - \alpha_I^{or.P}) \cdot (-R), \quad I = X, Y, Z. \quad (6)$$

Величина возмущающего момента определяется векторным произведением (4) и (6)

$$\bar{M}(\alpha_I, \alpha_I^{or.P}) = \Delta\bar{r}\,(\alpha_I) \times \bar{P}(\alpha_I^{or.P}), \quad I = X, Y, Z.$$

Эксцентриситет вектора тяги e как плечо силы тяги $\bar{P}$, создающей найденный возмущающий момент, найдем из скалярного выражения:

$$e(\alpha_I, \alpha_I^{or.P}) = \frac{\left|\bar{M}(\alpha_I, \alpha_I^{or.P})\right|}{P}. \quad (7)$$

Варьируя параметры, входящие в (7), можем выполнить анализ их влияния на величину e. Для оценки влияния случайных компонент варьируемых параметров можем выполнить статистический анализ. Приближенно эксцентриситет можно оценить как среднеквадратичное значение n экстремальных величин e_i, рассчитанных по (7) для предельных отклонений отдельно каждого i – го параметра:

$$e = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} e_i^2}\ .$$

Методика апробирована на тестовой задаче. Упрощенный вариант этой задачи был реализован в системе компьютерной математики (СКМ) Mathcad.

5. Выводы. Предложена концепция методики для расчёта эксцентриситета вектора тяги маршевого двигателя КЛА с применением компьютерной математики. Разработана упрощенная методика, которая позволяет оперативно оценивать влияние отклонений от номинальных значений различных проектных и конструкторских параметров. Она может быть полезна как специалистам, так и студентам при выполнении ими проектных и исследовательских работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели. – М., 2005г. - 486 с.
2. Колесников К.С., Козлов В.И. Кокушкин В.В. Динамика разделения летательных аппаратов. – М., Машиностроение, 1977, - 224 с.

УДК 534.121

М.Е. Шивохин

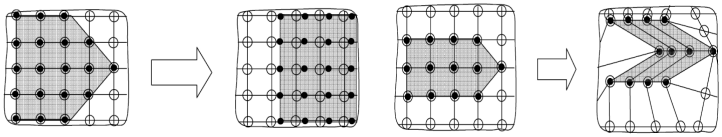
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СОУДАРЕНИЯ ПТИЦЫ С КОНСТРУКЦИЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Исследования задача соударения птицы с конструкцией летательного аппарата численным моделированием с использованием программных комплексов конечно-элементного моделирования.

1. Введение. Рассматривается задача соударения птицы с конструкцией летательного аппарата (ЛА). Исследования проводились численным моделированием с использованием программных комплексов конечно-элементного моделирования MSC. Dytran и LS-Dyna [1-3]. Результаты расчетов сравнивались с экспериментальными данными, приведенными в [1] и [2]. Изучалось влияния параметров модели на точность результатов. В качестве варьируемых параметров рассматривались характеристики конечных элементов модели.

Рассчитывались величины давления на обшивку и скорость пробития её. Модель птицы представлена в виде жидкого цилиндра с заданным отношением длины к диаметру L / D. Элемент обшивки моделировался квадратной пластиной определённых размеров, шарнирно опертой по всему контуру. В качестве критерия разрушения принято условие достижения в материале пластины определённого уровня эквивалентных пластических деформаций. Окружающая среда – либо вакуум (однофазная модель), либо воздух (двухфазная модель). Воздух рассматривался как идеальный газ при нормальных условиях.

2. Методика построения математической модели использует два подхода. Первый основан на описании движения каждой точки среды в отдельности. На поверхности и в теле модели исследуемого объекта размещена сетка, узловые точки которой считаются закрепленными. Элементы, на которые разбивается модель, связаны между собой через узловые точки. В процессе заданных взаимодействий узловые точки перемещаются и элементы деформируются. При другом подходе выделяется часть пространства и фиксируется информация о каждой частице, которая в неё попадает. В частности, движение модели объекта через сетку моделируется переносом количества движения и энергии от одного элемента массы к другому. При этом движение птицы описывается с помощью уравнений гидродинамики.



а **б**

Рис. 1. К построению математической модели:
а – первый подход; б – второй подход

3. Расчёты. Используя эту модель, проведены расчёты скорости пробития пластины для различных параметров расчётной модели, в частности, для исходных данных, соответствующих приводимым в [2] экспериментам. Сравнение говорит об удовлетворительном совпадении полученных результатов.

4. Результаты, полученные в настоящей работе, показали, что при выполнении расчетов с помощью рационально использовать элементы размером от 10 до 20 мм. Уменьшение размеров приводит к вычислительной неустойчивости, увеличение – к заметной погрешности. Учет влияния воздушной среды приводит к сглаживанию нагрузок за счет демпфирования в элементах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barber, John P., Taylor, H. R., and Wilbeck, James S., "Characterization of Bird Impacts on a Rigid Plate: Part I", AFFDL-TR-75-5, January. – 1975.
2. С.В. Семышев Динамическое взаимодействие элементов конструкции летательного аппарата с птицей. Автореферат дисс. канд. техн. наук ЦАГИ. – 2002.
3. Ю.В.Блажевич, В.Д.Иванов, И.Б.Петров, И.В. Петвиашвили Моделирование высокоскоростного соударения методом гладких частиц. //Математическое моделирование. – 1999, т.11, №1, с. 88-100.
4. Физика взрыва /Под ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е, испр. – В 2 т. Т.2. – М.: ФИЗ-МАТЛИТ. – 2004. – 656с.

УДК 536

С.В. Аринчев, В.В. Боровинский

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ НА ЗВУКОИЗОЛИРУЮЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОЛОВНОГО ОБТЕКАТЕЛЯ

Работа выполнена по тематике ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина». Рассматривается модификация головного обтекателя (ГО) ракеты. Использование новых типов теплоизоляционных покрытий и способов их приклеивания требует дополнительного анализа звукоизолирующих характеристик ГО. В работе предложена методика конечно-элементного моделирования конструктивно-подобных образцов ГО в условиях акустического нагружения. Результаты расчета сравниваются с результатами эксперимента.

Рассмотрены три конструктивно-подобных фрагмента ГО: панель с вариантом новой теплоизоляции, панель со старой штатной теплоизоляцией и панель без теплоизоляции.

Теплоизоляционный слой имеет малую жесткость, при расчете его масса отнесена на массу металлической однослойной обшивки. Конечно-элементное моделирование осуществлялось в препост-процессоре MSC.PATRAN2005, расчет модели – в пакете MSC.NASTRAN2005. В качестве критерия при сопоставлении результатов расчета и эксперимента выбрана спектральная плотность виброускорений заданного участка обшивки конструктивно-подобного фрагмента ГО.

Имеется удовлетворительное совпадение результатов расчета и результатов эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Научно-технический отчет №1-ИНТ-432-06 по договору №432/06 «Экспериментальное определение влияния теплоизоляционного покрытия на звукоизолирующие характеристики конструктивно-подобных панелей ГО».
2. Жидяев К.А., Усов А.В., Битадзе Т.Г., Дадунашвили С.Ш. Применение программных продуктов MSC.NASTRAN и MSC.PATRAN для анализа динамики и прочности конструкций под воздействием случайных нагрузок. – М.: 2003. – 43 с.

УДК 532

В.О. Герасименко, В.А. Грибков

МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГИДРОУПРУГОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CAE-ТЕХНОЛОГИЙ

Анализируются методы решения связанных динамических задач «жидкость-конструкция», принятые в CAE-технологиях. Наибольшее внимание уделяется комплексу MSC/ NASTRAN. Описываются методы решения гидроупругих задач в MSC/ NASTRAN, основанные на различных математических моделях системы: метод виртуальных масс (конечноэлементное представление конструкции без дискретизации объема жидкости); метод полной дискретизации системы «жидкость-конструкция» (конечноэлементная аппроксимация); использование акустических моделей для связанных задач «среда-конструкция»; применение чисто акустических моделей среды без учета податливости конструкции. Обсуждаются достоинства и недостатки каждого подхода. Эффективность методов оценивается по затратам машинного времени, потребным машинным ресурсам, точности расчета.

Наиболее рациональный (по указанным выше критериям) метод решения гидроупругих задач с тяжелой жидкостью применительно к ракетно-космическим конструкциям основан на введении виртуальных масс жидкости. Для описания свободной поверхности жидкости используются мембранные элементы с задаваемой жесткостью в узле поверхности. Тонкостенная конструкция моделируется пластинчатыми элементами. Для уменьшения размерности итоговых уравнений возможно использование конденсации по Крэйгу-Бэмптону. При этом редуцированная модель связывается со смачиваемой поверхностью с помощью интерфейсных узлов набора A-set. Реализация алгоритма приводит к симметричной формулировке итоговых уравнений сравнительно небольшой размерности.

Для оценки работоспособности и точности алгоритма выполнено решение ряда тестовых задач. В частности, получено решение задачи для составной баковой конструкции, заполненной тяжелой жидкостью при квазипоперечных колебаниях системы (колебаниях с одной окружной волной формы) [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Flanigan, C. C. Hydroelastyc Analysis of Incompressible Fluids Using SDRC I-Dias and MSC/NASTRAN // MSC/Nastran World Users Conference, Michigan, 1992.

УДК 620.1

И.В. Сапрунов
Научный руководитель: И.О. Эмри

К ПРОЕКТУ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ОПТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ И КОМПЬЮТЕРА ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОБРАЗЦОВ

Работа выполнялась в рамках программы сотрудничества Аэрокосмического факультета МГТУ им. Н. Э. Баумана и Центра Экспериментальной Механики (ЦЭМ), Университет Любляны (Словения). В процессе месячной стажировки в августе 2005 в ЦЕМ изучался вопрос концептуальной постановки задачи проектирования экспериментальной установки для исследований механических свойств образцов вязкоупругих полимерных материалов с использованием оптико-электронных устройств и компьютера. Была поставлена задача: разработать компьютерную программу, принципиально позволяющую на основе данных оптико-электронных наблюдений определять в ходе эксперимента значение тензора деформаций исследуемого образца.

Деформации образцов в эксперименте регистрируются с помощью фото- и видеокамеры. В исходном состоянии на поверхность образца наносится поле геометрических элементов. Поле задаем системой равномерно распределённых по поверхности образца геометрических объектов правильной формы, например в виде кругов или эллипсов. Координаты центров этих объектов размещаются в точках, определенных как узлы координатной сетки выбранной системы осей. Был разработан алгоритм идентификация объекта с помощью оптических средств. Соответствующая программа написана на языке Visual C++6.0 с использованием open source ресурсов. Для формирования изображения использовался редактор Paint. На тестовых примерах подтверждена работоспособность программы. Для более сложных геометрических объектов предусматриваем ввести в программу процедуру статистического определения координат.

Определив координаты всех узловых точек исходной сетки, идентифицируем начальное, недеформированное состояние образца в целом и формируем образ этого состояния виде массива данных. Затем, реализуя тот же алгоритм, идентифицируем деформированное состояние. Установив математическую связь между координатами узлов этих двух состояний, вычисляем тензор деформаций.

Были выполнены тестовые примеры, подтвердившие работоспособность разработанного алгоритма.

УДК 629.7.01

К.Н. Подсвиров

К ПОСТРОЕНИЮ ИНЕРЦИОННО-МАССОВОЙ МОДЕЛИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Обсуждается постановка вопроса о разработке компьютерной программы для расчета текущего положения центра масс и компонент тензора инерции космического аппарата (КА) в функции полетного времени. Программа будет использоваться в процессе проектирования КА и при моделировании его управляемого движения.

Предполагается, что твердотельная изменяемая модель КА может быть представлена совокупностью конечного числа материальных тел. Модель позволяет учитывать изменение массы топлива в баках при работе жидкостных реактивных двигателей системы управления, при горении твердого топлива, при трансформациях конструкции (раскрытие панелей, антенн, штанг, поворотах платформ, приборов и иного оборудования).

Возможность изменения линейных и угловых положений элементов конструкции КА позволяет моделировать влияние изменения его геометрии масс на процесс управляемого движения. Расчетные значения координат центра масс находятся вычислением статических моментов и массы КА [1,2].

Такая модель – необходимый инструмент построения системы параметрического управления ориентацией. С её помощью могут решаться задачи адаптивного управления.

Расчетному тензору инерции, в общем случае недиагональному, ставится в соответствие диагональный тензор и рассчитывается отвечающая ему ориентация связанных осей координат относительно исходных строительных осей координат. Расчет главных моментов инерции связан с поиском условного экстремума, например методом Лагранжа. Задача сводится к решению системы трех линейных однородных уравнений. Направляющие косинусы или углы ориентации находятся на основе использования основных свойств главных центральных осей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Раушенбах Б.В., Токарь Е.Н. Управление ориентации космических аппаратов.- М.: Наука, 1974.
2. Симоньянц Р.П. Космический аппарат как объект управления ориентацией. -М: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2002.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 532.5

Г.А. Щеглов

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ СВЯЗАННЫХ ЗАДАЧ ГИДРОУПРУГОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ВИХРЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Излагается методика прямого численного моделирования переходных режимов, возникающих при взаимодействии конструкции с дозвуковым потоком жидкости или газа. Для расчета нестационарных гидродинамических нагрузок предлагается использовать метод вихревых элементов.

1. Введение. Применение вихревых методов решения уравнения движения среды [1] в связанных задачах гидроупругости, возникающих при анализе динамики конструкций аэрокосмических систем, взаимодействующих с дозвуковым потоком жидкости или газа, актуально, поскольку позволяет существенно снизить затраты на проведение вычислений нестационарных гидродинамических нагрузок по сравнению с используемыми сегодня сеточными методами. Сокращение времени расчетов в вихревых методах происходит за счет концентрации вычислительных ресурсов в ограниченной пространственной области, где отлична от нуля завихренность, вместо вычисления скорости и давления в узлах сетки, заполняющей ограниченную расчетную область. При использовании вихревых методов возможно естественным образом рассматривать безграничную расчетную область и граничные условия «на бесконечности» выполняются автоматически.

Особенно эффективно применение данных методов в случае, когда течение вокруг упругого плохообтекаемого элемента конструкции сопровождается интенсивным вихреобразованием и вблизи гладкой обтекаемой поверхности заранее невозможно указать области отрыва потока. В настоящее время вихревые методы применяются при решении задач о плоскопараллельном течении жидкости [2, 3].

Связанная задача гидроупругости включает в себя уравнения упругой динамики конструкции, уравнение неразрывности и уравнение импульса для жидкости, а также начальные и граничные условия. Наиболее важным граничным условием в данной задаче является гра-

ничное условие прилипания на поверхности деформируемого тела, которое в случае вихревых методов сводится к условию непротекания и уравнению генерации завихренности. При исследовании пространственных течений вихревыми методами завихренность аппроксимируется множеством вихревых элементов: замкнутых вихревых рамок [4] или элементарных частиц завихренности – вортонов [5].

2. Построение расчетной модели. В работе рассматривается пространственная задача о вынужденных колебаниях упругой системы в трехмерном потоке несжимаемой среды с малой вязкостью. Целью работы является отработка методики прямого численного моделирования переходных режимов в узлах крепления конструкции.

В качестве модельной задачи рассматривается упругий стержень постоянного поперечного сечения со сферическим закруглением на торце, закрепленный на неподвижном осесимметричном основании при помощи податливых опор (рис.1). Стержень имеет длину L и диаметр D. Ось стержня работает на изгиб как балка, имеющая постоянное по длине поперечное сечение. Опоры работают как линейные пружины жесткости C_i, $(i = 1,...,4)$.

Вводится неподвижная система координат $OXYZ$. Ось цилиндра в положении равновесия совпадает с осью OY неподвижной системы координат. Пружины установлены в плоскостях OXY и OYZ и присоединены к упругой оси при помощи идеальных шарниров. Один шарнир установлен на краю балки, совпадающем с началом системы координат, а другой отстоит на расстоянии L_1. Жесткости балки при изгибе в плоскости OXY и OYZ одинаковы и равны EJ.

Описанная конструкция находится в потоке несжимаемой среды плотностью ρ, внезапно приведенном в движение с постоянной скоростью $\vec{V}_\infty$. Вязкость среды считается малой.

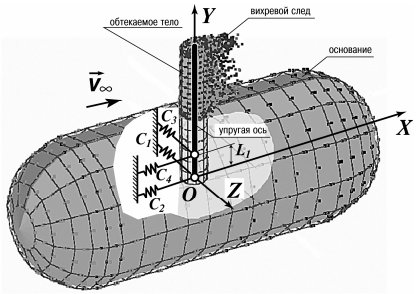


Рис. 1. Расчетная схема задачи

Исследуются прогибы балки $w(y,t)$ в плоскости OXY и $u(y,t)$ в плоскости OYZ. Исследуется переходный режим с начальными условиями $w(y,0)=0;\ \dot{w}(y,0)=0\,; u(y,0)=0;\ \dot{u}(y,0)=0$.

3. Дискретизация упругой модели (рис. 2). Балка разбивается на q участков. Массы участков m_i сосредотачиваются в $N=q+1$ узлах, имеющих координаты y_i. Система дифференциальных уравнений динамики узлов стержня имеет вид:

$$\begin{aligned}[M]\{\ddot{W}\}+[K]\{W\}=\{F_X\}\\ [M]\{\ddot{U}\}+[K]\{U\}=\{F_Z\}\end{aligned}, \qquad (1)$$

где $\{W\}$, $\{U\}$ – перемещения узлов в соответствующих плоскостях; $[M]$ – матрица масс; $[K]$ – матрица жесткости; $\{F_X\}$ $\{F_Z\}$ – проекции векторов аэродинамической нагрузки $\vec{F}_i$ на соответствующие оси.

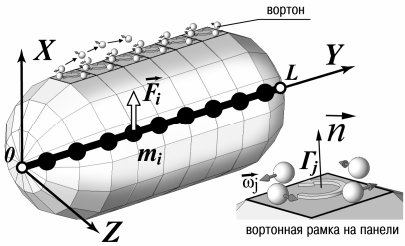


Рис.2. Дискретизация модели

Поверхность обтекаемых тел аппроксимируется многогранником, составленным из N_p четырехугольных панелей. Каждая j-ая панель задана координатами вершин $\vec{r}_{js}$ ($s=1,...,4$), длинами ребер L_{js}, единичными направляющими векторами ребер $\vec{\tau}_{js}$; контрольной точкой $\vec{k}_{0j}$ и внешней нормалью к панели в контрольной точке $\vec{n}_j$. Площадь панели равна s_j.

Формоизменение стержня при изгибе упругой оси производится согласно гипотезе плоских сечений. Расположение, размеры и другие параметры панелей деформированного тела вычисляются по известным векторам перемещений $\{S_X\}$ и $\{S_Z\}$. При расчете формоизменения профиля находятся скорости движения деформируемой поверхности в контрольных точках панелей $\vec{U}_{Kj}$.

Каждому узлу y_i ставятся в соответствие N_{Pi} панелей на контуре профиля. По известному давлению $p\left(\vec{k}_l, t\right)$ вблизи этих панелей определяются аэродинамические нагрузки, приведенные к узлу

$$\vec{F}_i = \sum_{l=1}^{N_{Pi}} s_l \; p\left(\vec{k}_l, t\right)\vec{n}_l \; .$$

Давление $p\left(\vec{k}_l, t\right)$ определяется по нестационарному полю скоростей $\vec{V}(\vec{r}, t)$. При вычислении поля скоростей используется подход Прандтля. Влияние вязкости считается пренебрежимо малым везде, кроме тонкого пограничного слоя вблизи поверхности тела. Движение жидкости описывается уравнением неразрывности $div\vec{V} = 0$ и уравнением Эйлера, которое записывается в форме Ламба

$$\frac{d\vec{\Omega}}{dt} = \left(\vec{\Omega}\nabla\right)\vec{V} \, , \qquad (2)$$

где $\vec{\Omega} = rot\vec{V}$ – завихренность. Граничные условия (2) заданы на бесконечности $\lim\limits_{r\to\infty} \vec{V}\left(\vec{r}, t\right) = \vec{V}_\infty$ и на поверхности тела

$$\left[\vec{V}\left(\vec{k}_j, t\right) - \vec{U}_{Kj}\right]\vec{n}_j = 0 \, .$$

4. Аппроксимация вихревого следа. При дискретизации уравнений движения жидкости область, занятая завихренностью (вихревой след), аппроксимируется множеством из N_V вихревых элементов – вортонов. Вортон представляет собой сферу, заполненную завихренностью. Параметрами *i*-го вортона являются координаты центра $\vec{r}_i$, радиус сферы ε_i, и вектор интенсивности $\vec{\omega}_i$. Скорость, индуцируемая вортоном в точке $\vec{r}$, определяется выражением

$$\vec{U}_i\left(\vec{r}, t\right) = \vec{K}\left(\varepsilon_i, \vec{r} - \vec{r}_i\right) \times \vec{\omega}_i\left(t\right); \quad \vec{K}\left(\varepsilon, \vec{r}\right) = \begin{cases} -\dfrac{\vec{r}}{4\pi\left|\vec{r}\right|^3} f\left(\dfrac{\left|\vec{r}\right|}{\varepsilon}\right), \; \vec{r} \neq 0 \\ 0, \;\; \vec{r} = 0 \end{cases};$$

$$f\left(x\right) = \frac{2x^5 + 5x^3}{2\left(x^2 + 1\right)^{5/2}} \, .$$

Скорость жидкости вычисляется как

$$\vec{V}(\vec{r},t)=\vec{V}_{\infty}+\sum_{i=1}^{N_V}\vec{U}_i(\vec{r},t). \qquad (3)$$

5. Эволюция поля завихренности с течением времени складывается из движения вортонов по жидким линиям, сопровождающегося изменением параметров вортонов и процесса генерации новых вортонов. Движение вортонов описывается системой уравнений

$$\frac{d\vec{r}_i}{dt}=\vec{V}(\vec{r}_i,t),\ i=1,...N. \qquad (4)$$

Изменение векторов завихренности вортонов описывает система

$$\frac{d\vec{\omega}_i}{dt}=\vec{Q}(\vec{r}_i,t),\ i=1,...N. \qquad (5)$$

При движении вихревого следа для выполнения теорем Кельвина и Гельмгольца проводится изменение радиуса вортонов методом «расплющивания ядра» [5]. На шаге расчета вортон удлиняется в направлении вектора завихренности в соответствии с уравнениями

$$\frac{dL_i}{dt}=\frac{L_{0i}}{|\vec{\omega}_i|}\left|\frac{d\vec{\omega}_i}{dt}\right|, \qquad (6)$$

$$\frac{d\varepsilon_i}{dt}=-\frac{\varepsilon_i(t)}{2L_{0i}}\frac{dL_i}{dt}, \qquad (7)$$

где L_{0i} – диаметр вортона в начале шага интегрирования, L_i – длина вортона в направлении вектора завихренности в конце шага интегрирования. Удлиненный вортон при переходе к новому шагу интегрирования заменяется сферой равного объема. Модуль вектора завихренности корректируется по формуле

$$\left|\vec{\omega}_i^{*}(t+dt)\right|=\left|\vec{\omega}_i(t+dt)\right|\left(\frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon(t+dt)}\right)^2.$$

6. Генерация завихренности моделируется рождением сферических вортонов вблизи поверхности тела. Над ребрами панелей задаются точки рождения вортонов. Вектора завихренности вортонов направлены так, чтобы над каждой панелью была сформирована замкнутая рамка (рис.2). Параметры вихревых элементов вортонной рамки определяются выражениями

$$\vec{r}_{jsz}^{B}=\vec{r}_{jsz}+z\frac{L_{js}}{u_s+1}\vec{\tau}_{js}+\delta\vec{n}_j;\ \varepsilon_{jsz}^{B}=\frac{L_{js}}{u_s+1};\ \vec{\omega}_{jsz}^{B}=\Gamma_j\vec{\tau}_{js};\ z=1,...,u_s, \qquad (8)$$

где $0<\delta<\min(\varepsilon_i^B)$ – возвышение вортона над телом.

Вортоны, рождающиеся над одной рамкой имеют одинаковый модуль вектора $\vec{\omega}_i^B$, равный циркуляции рамки A_j. Эти циркуляции находятся из решения системы линейных алгебраических уравнений, соответствующих условиям непротекания в контрольных точках $\vec{k}_j$

$$\sum_{l=1}^{N_P} \Gamma_l \left(\vec{W}_l \left(\vec{k}_j \right) \cdot \vec{n}_j \right) = -\left[\vec{V} \left(\vec{k}_j \right) - \vec{U}_{Kj} \right] \vec{n}_j, \quad j = 1, \ldots N_P, \qquad (9)$$

где $\vec{W}_l \left(\vec{r} \right) = \sum_{s=1}^{m} \sum_{z=1}^{u_s} \vec{K} \left(\varepsilon_{lsz}^B, \vec{r} - \vec{r}_{lsz}^B \right) \times \vec{\tau}_{ls}$ – вектор влияния вортонной рамки. Для замкнутых тел матрица системы (9) получается вырожденной. В этом случае используется регуляризация, применяемая в методе дискретных вихрей [4].

Давление определяется с использованием аналога интеграла Коши–Лагранжа, рассмотренного в работе [6]

$$p\left(\vec{r},t\right) = p_\infty + \rho \frac{\vec{V}_\infty^2}{2} - \rho \frac{\vec{V}\left(\vec{r},t\right)^2}{2} - \rho I_B(t) + \rho \sum_{i=1}^{N} \vec{V}\left(\vec{r}_i,t\right) \vec{U}_i\left(\vec{r},t\right), \quad (10)$$

где I_B – вклад в давление от вортонов, рожденных на текущем шаге.

7. Алгоритм решения задачи (рис.3) содержит два блока: упругую подсистему и гидродинамическую подсистему. Общим элементом этих подсистем, связывающим задачу гидроупругости, является блок генерации вортонов. В этом блоке происходит решение системы (9), матрица которой определяется параметрами панелей деформированной поверхности, а правая часть – нормальными составляющими относительной скорости потока в контрольных точках.

На шаге расчета сначала происходит построение расчетной схемы из вортонных рамок на поверхности тела, решение системы (9) и пополнение вихревого следа новыми вортонами. Далее определяется поле давлений на поверхности тела по формуле (10) и вычисление гидродинамических нагрузок в узлах. Это позволяет на шаге проинтегрировать уравнения динамики тела (1) под действием вычисленных нагрузок и рассчитать деформированную форму тела. В конце шага производится интегрирование уравнений эволюции вихревого следа (4) – (7).

Система (1) интегрируется методом Рунге–Кутта четвертого порядка с шагом h. Дифференциальные уравнения (4) – (7) интегрируются методом Эйлера первого порядка с шагом Δt. При перемещении вихревых элементов проверяется условие «протыкания». Вортоны, по-

павшие внутрь тела, возвращаются в поток. Цикл вычислений продолжается до достижения заданного времени.

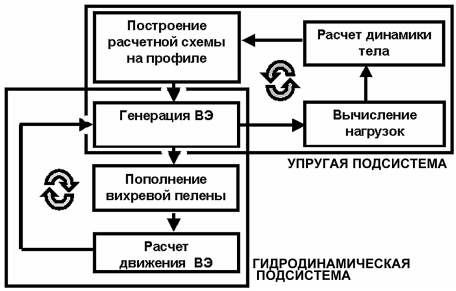


Рис.3. Алгоритм решения задачи

8. Результаты расчета переходного режима представлены ниже. Все используемые параметры являются безразмерными. Вектор скорости набегающего потока $\vec{V}_\infty = \{1,0;0,0;0,0\}^T$. Плотность среды и давление «на бесконечности» приняты единичными. Габариты стержня $L = 1,0$, $D = 0,2$. Основание имеет форму цилиндра со сферическими торцами. Длина основания $L_O = 2,4$, диаметр $D_O = 1,2$. Параметры расчетной схемы $N_p = 332$, $\varepsilon = 0,004$, $\delta = 0,01$. Упругая ось тела имеет $N = 16$ узлов. Параметры упругой оси $EJ = 1$, $m_i = 0,27$. Жесткости пружин $N_i = 100$. Расстояние между пружинами $L_1 = 0,3$. Шаги интегрирования равны $\Delta t = 0,01$ $h = 0,0004$.

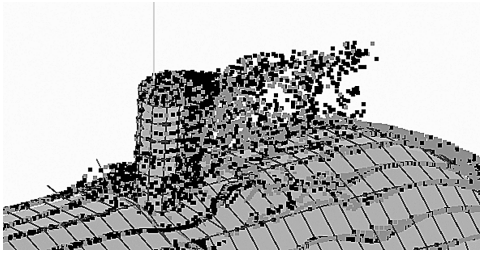


Рис.4. Вид вихревого следа, состоящего из вортонов

На рис. 4 показан вид вихревого следа на 30-м шаге. След составлен из 30447 вортонов, показанных на рисунке точками серого и черного цвета. На рис. 5 для прояснения картины течения вместо вихревой пелены показаны фрагменты линий тока, построенные от кон-

трольных точек стержня с шагом $\tau = 0,03$ (использовано 50 шагов). На рис. 5 хорошо заметна область за стержнем, где начинает формироваться шахматная дорожка вихрей.

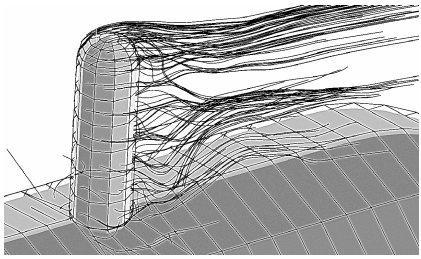


Рис.5. Фрагменты линий тока вблизи упругой конструкции

На рис. 6 даны графики перемещений пружин C_2, C_4, удерживающих стержень в направлении «по потоку», а на рис. 7 – перемещения пружин C_1, C_3, удерживающих стержень от перемещений «поперек потока». Из рисунков видно, что наряду с относительно большими перемещениями упругой конструкции, вызванными действием скоростного напора, имеют место и малые поперечные колебания, вызванные нестационарным вихреобразованием вблизи поверхности тела.

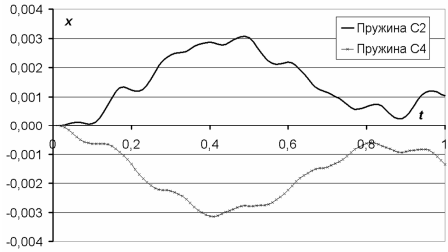


Рис.6. Перемещения пружин в плоскости *OXY* (колебания по потоку)

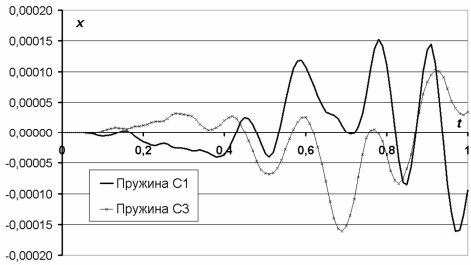


Рис.7. Перемещения пружин в плоскости *OYZ* (колебания поперек потока)

На рис. 8 представлены осциллограммы прогибов свободного конца стержня. На рис. 9 и рис. 10 представлены виды деформированной упругой оси стержня в различные моменты времени.

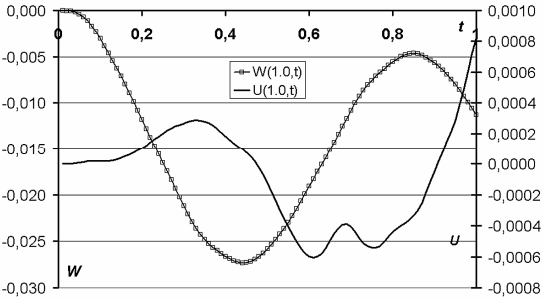


Рис.8. Осциллограмма прогибов свободного края стержня (*y*=1,0)

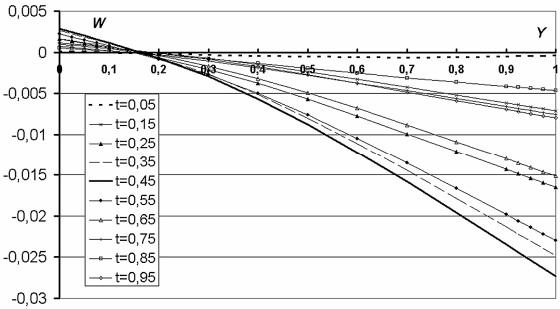


Рис.9. Прогибы стержня в плоскости *OXY*

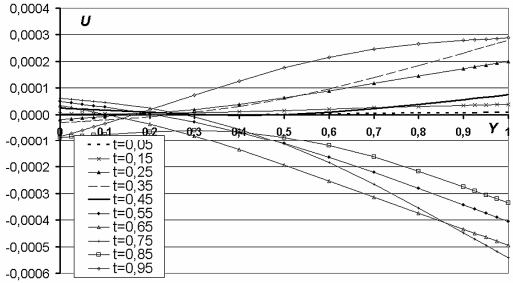


Рис.10. Прогибы стержня в плоскости *OYZ*

На компьютере с процессором Pentium IV, тактовой частотой 2,6 ГГц расчет 100 шагов потребовал 24 часов счета. Все расчеты про-

изведены с помощью написанной автором программы MDVDD, реализующей описанный алгоритм.

9. Выводы. Результаты численных экспериментов показывают применимость метода вихревых элементов с вортонными рамками на теле для решения уравнения движения среды и определения нестационарных гидродинамических нагрузок.

При решении связанных задач гидроупругости метод дает возможность устойчиво рассчитывать переходные режимы в случае интенсивного пространственного вихреобразования, когда на гладкой обтекаемой поверхности заранее невозможно указать точки схода вихрей.

Предлагаемая методика может быть использована для решения задач гидроупругой динамики элементов конструкций аэрокосмических систем.

Работа поддержана грантом РФФИ №06-08-00646.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сарпкайя Т. Вычислительные методы вихрей. Фримановская лекция (1988) // Современное машиностроение. Сер. «А». – 1989, №10. – С. 1-60.
2. Morgenthal G. Aerodynamic Analysis of Structures Using High-resolution Vortex Particle Method. – Cambridge, 2002. – 185 p.
3. Щеглов Г.А. Расчет нестационарной аэроупругой динамики элемента конструкции аэрокосмической системы методом дискретных вихрей//Образование через науку. Сборник докладов Международного симпозиума. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – С. 141-148
4. Трехмерное отрывное обтекание тел произвольной формы/ Белоцерковский С.М. – М.:ЦАГИ, 2000. – 265 с.
5. Ojima A., Kamemoto K. Numerical simulation of unsteady flow around three dimensional bluff bodies by an advanced vortex method.// JSME International Journal. – Series B, Vol.43, No.2 (2000). – p. 127-135.
6. Дынникова Г.Я. Силы, действующие на тело, при нестационарном вихревом отрывном обтекании идеальной несжимаемой жидкостью// Изв. РАН МЖГ. – 2001. – №2. – С. 128-138.

УДК 519.63+662.21

Ю.И. Димитриенко, М.А.Воронцова

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ЗАДАЧИ КУМУЛЯЦИИ

Рассматриваются проблемы математического моделирования процессов кумуляции, детонации и пластического деформирования. Разработан метод расчета и алгоритм решения задачи распространения динамических процессов в перспективных кумулятивных системах

1. Введение. После взрыва капсюля-детонатора, находящегося на противоположной стороне заряда по отношению к кумулятивной выемке, возникает детонационная волна (ДВ), которая перемещается вдоль оси снаряда. За фронтом волны образуется газовая фаза, и в материале облицовки возникают большие пластические деформации. При достижении кумулятивной выемки ее материал также «течет», но в противоположном направлении, что обуславливает пробивное действие заряда. На рис. 1 изображено сечение кумулятивного снаряда.

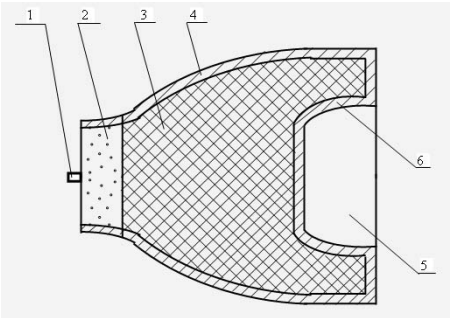


Рис. 1. Сечение кумулятивного снаряда: 1 – детонатор; 2 – газ за детонационной волной; 3 – взрывчатое вещество; 4 – оболочка; 5 – кумулятивная выемка; 6 – облицовка кумулятивной выемки.

2. Постановка осесимметричной задачи. Рассмотрим частный случай, когда область $\overset{0}{V}$ в отсчетной конфигурации $\overset{0}{K}$ и группа симметрии G_S имеют ось симметрии OX_3 в лагранжевой системе координат X_i, в качестве которой выберем цилиндрическую систему:

$X^1 = r, \quad X^2 = \varphi, \quad X^3 = z$. Тогда может быть сформулирована осесимметричная постановка задачи. Запишем эту постановку в физических координатах, используя компонентную запись дифференциальных операторов и тензоров:

$$\overset{\circ}{\rho}\frac{\partial \overset{\circ}{v}_r}{\partial t} = \frac{\partial P_{rr}}{\partial r} + \frac{P_{rr} - P_{\varphi\varphi}}{r} + \frac{\partial P_{rz}}{\partial z}, \quad \overset{\circ}{\rho}\frac{\partial \overset{\circ}{v}_z}{\partial t} = \frac{\partial P_{zr}}{\partial r} + \frac{P_{zr}}{r} + \frac{\partial P_{zz}}{\partial z}, \quad \frac{\partial \overset{\circ}{u}_r}{\partial t} = \overset{\circ}{v}_r,$$

$$\frac{\partial \overset{\circ}{u}_z}{\partial t} = \overset{\circ}{v}_z, \quad \frac{dF_{rr}}{dt} = \frac{\partial \overset{\circ}{v}_r}{\partial r}, \quad \frac{dF_{\varphi\varphi}}{dt} = \frac{\overset{\circ}{v}_r}{r}, \quad \frac{dF_{zz}}{dt} = \frac{\partial \overset{\circ}{v}_z}{\partial z}, \quad \frac{dF_{rz}}{dt} = \frac{\partial \overset{\circ}{v}_r}{\partial z}, \quad \frac{dF_{zr}}{dt} = \frac{\partial \overset{\circ}{v}_z}{\partial r},$$

$$\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} T_{rr} \\ T_{\varphi\varphi} \\ T_{zz} \\ T_{rz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & 0 \\ C_{1122} & C_{1111} & C_{1133} & 0 \\ C_{1133} & C_{1133} & C_{3333} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2C_{1313} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} e_{rr} \\ e_{\varphi\varphi} \\ e_{zz} \\ e_{rz} \end{pmatrix}, \qquad (1)$$

где: $C_{1111} = C_{2222} = C_{3333} = E$, $C_{1313} = \dfrac{E}{2(1+\nu)}$, $C_{1122} = C_{1133} = \nu E$ – компоненты матрицы упругостей, ν - коэффициент Пуассона; E – модуль упругости материала (модуль Юнга); $T_{11} = T_{rr}$, $T_{22} = T_{\varphi\varphi}$, $T_{33} = T_{zz}$, T_{rz} – физические компоненты тензора истинных напряжений в актуальной конфигурации. Компоненты тензора Пиола-Кирхгофа вычисляются по формулам:

$$P_{rr} = \frac{\overset{\circ}{\rho}}{\rho}\left(T_{rr}F_{rr} + T_{rz}F_{rz}\right); \quad P_{\varphi\varphi} = \frac{\overset{\circ}{\rho}}{\rho}T_{\varphi\varphi}F_{\varphi\varphi}; \quad P_{zz} = \frac{\overset{\circ}{\rho}}{\rho}\left(T_{zz}F_{zz} + T_{rz}F_{zr}\right);$$

$$P_{rz} = \frac{\overset{\circ}{\rho}}{\rho}\left(T_{rz}F_{zz} + T_{rr}F_{zr}\right); \quad P_{zr} = \frac{\overset{\circ}{\rho}}{\rho}\left(T_{rz}F_{rr} + T_{zz}F_{rz}\right).$$

Физические компоненты тензора скоростей деформаций:

$$e_{rr} = \frac{\partial \overset{\circ}{v}_r}{\partial r}F_{rr} + \frac{\partial \overset{\circ}{v}_z}{\partial r}F_{zr}; e_{\varphi\varphi} = \frac{\overset{\circ}{v}_r}{r}F_{\varphi\varphi}; e_{zz} = \frac{\partial \overset{\circ}{v}_r}{\partial z}F_{rz} + \frac{\partial \overset{\circ}{v}_z}{\partial z}F_{zz};$$

$$e_{rz} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial \overset{\circ}{v}_r}{\partial r}F_{rz} + \frac{\partial \overset{\circ}{v}_z}{\partial z}F_{zr} + \frac{\partial \overset{\circ}{v}_r}{\partial z}F_{zz} + \frac{\partial \overset{\circ}{v}_z}{\partial r}F_{rr}\right).$$

Плотность в актуальной конфигурации вычисляется через плотность в отсчетной конфигурации и определитель тензора градиента деформаций:

$$\rho = \overset{0}{\rho}\det\overline{F}. \qquad (2)$$

Уравнения состояния идеального газа записывается как:

$$\overline{T} = -p \cdot \overline{E}. \qquad (3)$$

Начальные условия. Запишем начальные условия на другие параметры для разных сред:

Материал облицовки: Взрывчатое вещество: Газовая среда:

$$\begin{cases} \rho_0 = \rho_1, \\ v_{z0} = -D_{TT}, \\ T_{rr0} = 0, \\ T_{\varphi\varphi 0} = 0, \\ T_{zz0} = 0; \end{cases} \quad \begin{cases} \rho_0 = \rho_{BB} \equiv \rho_2, \\ v_z = 0, \\ T_{rr} = 0, \\ T_{\phi\phi} = 0, \\ T_{zz} = 0; \end{cases} \quad \begin{cases} \rho_0 = \rho_{gas}, \\ v_z = -D, \\ T_{rr} = -P, \\ T_{\phi\phi} = -P, \\ T_{zz} = -P, \end{cases} \qquad (4)$$

где значение скорости звука в материале облицовки D_{TT} выражается из соотношения $D_{TT} = \sqrt{\frac{E}{\rho_1}}$, а значение давления газа в начальный момент времени выражается по формуле (согласно условию баротропности):

$$P = A_0 \cdot \rho_{gas}^{\gamma}. \qquad (5)$$

Следует отметить, что в материале облицовки и взрывчатом веществе компоненты тензора Коши нулевые вследствие неподвижности самой среды.

Граничные условия. Для решения поставленной задачи необходимо задание граничных условий. Эти условия мы будем применять для системы, записанной после приведения к безразмерному виду

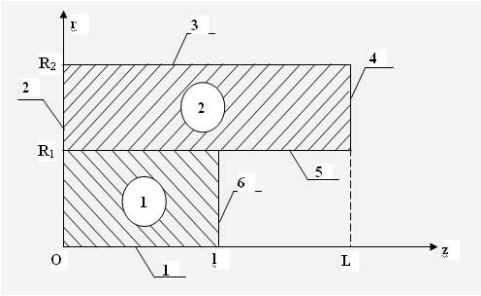


Рис. 2

В математической записи граничные условия для первой границы (условие симметрии, $0 \le z < l, r = 0$) записаны в (6). Для остальных границ выполняются условия, соответствующие свободной поверхности. Запишем координаты каждой из этих границ:

2: $z = 0, 0 < r < R_2$;

3: $0 \le z < L, r = R_2$;

4: $R_1 < r < R_2, z = L$;

5: $l \le z < L, r = R_1$;

6: $z = l, 0 \le r < R_1$.

Для границ 2, 4, 6 – условия (7), для оставшихся границ – (8).

$$\begin{cases} v_r(t,z,r=0)=0, \\ \dfrac{\partial v_z(t,z,r=0)}{\partial r}=0, \\ \dfrac{\partial F_{rr}(t,z,r=0)}{\partial r}=0, \\ F_{\varphi\varphi}(t,z,r=0)=0, \\ \dfrac{\partial F_{zz}(t,z,r=0)}{\partial r}=0, \\ F_{rz}(t,z,r=0)=0, \\ \dfrac{\partial F_{zr}(t,z,r=0)}{\partial r}=0, \\ \dfrac{\partial T_{rr}(t,z,r=0)}{\partial r}=0, \\ \dfrac{\partial T_{\varphi\varphi}(t,z,r=0)}{\partial r}=0, \\ \dfrac{\partial T_{zz}(t,z,r=0)}{\partial r}=0, \\ T_{rz}(t,z,r=0)=0. \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \dfrac{\partial v_r(r,z^*)}{\partial z}=0, \\ \dfrac{\partial v_z(r,z^*)}{\partial z}=0, \\ \dfrac{\partial F_{rr}(r,z^*)}{\partial z}=0, \\ \dfrac{\partial F_{\varphi\varphi}(r,z^*)}{\partial z}=0, \\ \dfrac{\partial F_{zz}(r,z^*)}{\partial z}=0, \\ \dfrac{\partial F_{rz}(r,z^*)}{\partial z}=0, \\ \dfrac{\partial F_{zr}(r,z^*)}{\partial z}=0, \\ T_{rr}(r,z^*)=0, \\ \dfrac{\partial T_{\varphi\varphi}(r,z^*)}{\partial z}=0, \\ \dfrac{\partial T_{zz}(r,z^*)}{\partial z}=0, \\ T_{rz}(r,z^*)=0. \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \dfrac{\partial v_r(r^*,z)}{\partial r}=0, \\ \dfrac{\partial v_z(r^*,z)}{\partial r}=0, \\ \dfrac{\partial F_{rr}(r^*,z)}{\partial r}=0, \\ \dfrac{\partial F_{\varphi\varphi}(r^*,z)}{\partial r}=0, \\ \dfrac{\partial F_{zz}(r^*,z^*)}{\partial z}=0, \\ \dfrac{\partial F_{rz}(r^*,z)}{\partial r}=0, \\ \dfrac{\partial F_{zr}(r^*,z)}{\partial r}=0, \\ \dfrac{\partial T_{rr}(r^*,z)}{\partial r}=0, \\ \dfrac{\partial T_{\varphi\varphi}(r^*,z)}{\partial r}=0, \\ T_{zz}(r^*,z)=0, \\ T_{rz}(r^*,z)=0. \end{cases} \quad (8)$$

Здесь $z*$ – значения продольной координаты каждой границы, $r*$ – значения поперечной (радиальной) координаты каждой границы.

3. Безразмерная форма. После приведения к безразмерной форме получаем систему в матричном виде:

$$\frac{\partial U}{\partial t}+\Phi_1(U)\cdot\frac{\partial W_1(U)}{\partial r}+\Phi_2(U)\cdot\frac{\partial W_2(U)}{\partial z}+\Phi_3(U)\cdot\frac{\partial W_1(U)}{\partial z}+ \\ +\Phi_4(U)\cdot\frac{\partial W_2(U)}{\partial r}+\frac{G(U)}{r}=0, \tag{9}$$

где: $U=\left[v_r,\ v_z,\ F_{rr},\ F_{\phi\phi},\ F_{zz},\ F_{rz},\ F_{zr},\ T_{rr},\ T_{\phi\phi},\ T_{rz},\ u_r,\ u_z,\ \rho\right]^T$ – вектор-столбец искомых параметров, а $W_1(U),W_2(U),G(U)$ – вектор-функции и $\Phi_1(U),\Phi_2(U),\Phi_3(U),\Phi_4(U)$ – коэффициенты соответственно.

При приведении к безразмерному виду соотношений Ренкина-Гюгонио имеем:

$$\begin{cases}\bar{\rho}_1\cdot\left(\bar{v}_{z1}-\bar{D}\right)=\bar{\rho}_2\cdot\left(\bar{v}_{z2}-\bar{D}\right),\\ \bar{\rho}_1\cdot\left(\bar{v}_{z1}-\bar{D}\right)^2+A\cdot\bar{P}_1=\bar{\rho}_2\cdot\left(\bar{v}_{z2}-\bar{D}\right)^2+A\cdot\bar{P}_2,\\ \dfrac{k_1}{1-k_1}\cdot A\cdot\dfrac{\bar{P}_1}{\bar{\rho}_1}+\dfrac{\left(\bar{v}_{z1}-\bar{D}\right)^2}{2}=B+\dfrac{k_2}{1-k_2}\cdot A\cdot\dfrac{\bar{P}_2}{\bar{\rho}_2}+\dfrac{\left(\bar{v}_{z2}-\bar{D}\right)^2}{2},\end{cases} \tag{10}$$

где $$A=\frac{P_0}{\rho_0\cdot a_0^2},\qquad B=\frac{e_0}{a_0^2}\cdot$$

Из этой системы уравнений находим выражения для неизвестных параметров в зависимости от скорости ДВ и параметров твердого вещества, расположенного перед ДВ.

4. Спрямление системы координат. Переведем системы уравнений в новую систему координат. Можно выделить две области изменения координат: $r'\in[0,R_1],z'\in[0,l]$ и $r''\in\left[R_1,R_2\right],z''\in\left[0,L\right]$. Если рассматривать всё тело осесимметричной формы, то для перехода в новую систему координат будем иметь:

$$\begin{cases}r'=k(z)\cdot r+b(z)\\ z'=z,\end{cases} \tag{11}$$

где $$k(z)=\begin{cases}R_1\left[f_0(z)\right]^{-1}, & \text{если}\quad r\le R_1\quad u\quad z\le l,\\ \left(R_2-R_1\right)\left[f_+(z)-f_0(z)\right]^{-1}, & \text{если}\quad R_1<r\le R_2,\quad z\le l,\\ \left(R_2-R_1\right)\left[f_+(z)-f_-(z)\right]^{-1}, & \text{если}\quad l<z\le L,\end{cases}$$

$$b(z)=\begin{cases}0, & \text{если}\quad r\le R_1\quad u\quad z\le l,\\ R_1-\left(R_2-R_1\right)\left[f_+(z)-f_-(z)\right]^{-1}\cdot R_0, & \text{если}\quad R_1<r\le R_2\quad z\le l,\\ R_1-\left(R_2-R\right)\left[f_+(z)-f_-(z)\right]^{-1}\cdot R_0, & \text{если}\quad l<z\le L.\end{cases}$$

Введем новые обозначения коэффициентов при производных:

$$\Phi^*_1(U)=\Phi_1(U)\cdot k(z)+\Phi_3(U)\cdot \dot{k}(z)\cdot r;\Phi^*_2(U)=\Phi_2(U)\cdot \dot{b}(z);\Phi^*_3(U)= \\ =\Phi_3(U)\cdot \dot{b}(z);\Phi^*_4(U)=\Phi_2(U)\cdot \dot{k}(z)\cdot r+\Phi_4(U)\cdot k(z);\Phi^*_5(U)=\frac{1}{k(z)\cdot r+b(z)}. \quad (12)$$

Тогда полученная система уравнений может быть записана в более компактном виде:

$$\frac{\partial U}{\partial t}+\Phi^*_1(U)\cdot\frac{\partial W_1(U)}{\partial r}+\Phi^*_2(U)\cdot\frac{\partial W_2(U)}{\partial z}+\Phi^*_3(U)\cdot\frac{\partial W_1(U)}{\partial z}+ \\ +\Phi^*_4(U)\cdot\frac{\partial W_2(U)}{\partial r}+\Phi^*_5(U)\cdot G=0 \quad (13)$$

Задача решалась с помощью метода Мак-Кормака с введением третьего шага – сглаживания. Расчет проводился при шаге по времени $dt=10^{-6}$ (безразмерный) и коэффициенте сглаживания по r и по z 0.01.

5. **Выводы.** Выполненные в работе исследования по проблеме численного моделирования динамических процессов в перспективных кумулятивных системах дали следующие результаты:

1. Сформулированы основные допущения, на основе которых построена математическая модель процесса детонации и пластического течения материала облицовки. Заданы начальные и граничные условия, а также условия на фронте детонационной волны, из которых предложен способ задания скорости волны.

2. Для численного решения задачи выбран метод Мак-Кормака, хорошо решающий задачи аэрогидродинамики. Выбранный метод не выделяет разрывы, появление которых возможно при решении задач с ударными волнами. Устойчивость метода исследовалась как теоретически, так и на конкретном примере. Найдено условие устойчивости (при разных значениях безразмерного шага времени: 10^{-4}, 10^{-5}, 10^{-6}). Показано, что степень аппроксимации метода для задачи равна 2.

3. Разработан метод расчета и алгоритм решения задачи распространения динамических процессов в перспективных кумулятивных системах. Алгоритм решения был программно реализован с использованием численной схемы «сквозного счета» метода Мак-Кормака. Этот метод позволяет рассчитать такую задачу с наименьшими потерями времени. В результате был проведен расчет при значении безразмерного шага времени 10 – 6 и коэффициенте сглаживания 0.02.

4. Установлено, что недостаток условий на границе контакта «газовая фаза – материал облицовки» ведет к появлению осцилляций, сгладить которые можно при задании большего коэффициента сглаживания в методе Мак-Кормака, либо нахождением шага по времени, при котором эти осцилляции сводятся к минимуму. Отмечено, что кор-

ректное и точное задание начальных условий также влияет на появление осцилляций. Например, при задании начальной скорости звука в материале облицовке значительно менялось поведение графиков в крайних левых сечениях по z.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аттетков А.В., Гнускин А.М., Пырьев В.А., Сагидуллин Г.Г. Резка металлов взрывом. Москва. Изд-во СИП РИА, 2000г.
2. Зверев И.Н., Смирнов Н.Н. Газодинамика горения. Издательство Московского университета. 1987.
3. Калиткин Н.Н. Численные методы. Москва. «Наука». Главная редакция физико-математической литературы. 1978.
4. Кобылкин И.Ф., Соловьев В.С. Критические условия распространения детонационных процессов. Издательство МГТУ, 1991.
5. Селиванов В.В., Соловьев В.С., Сысоев Н.Н. Ударные и детонационные волны. Методы исследования. Издательство Московского университета, 1990.
6. Соловьев В.С. Методология экспериментальных исследований явлений взрыва и удара. Москва, 1984.
7. Яковлев Ю.С. Гидродинамика взрыва. Государственное союзное издательство судостроительной промышленности. Ленинград. 1961.
8. Андреев С.Г., Бабкин А.В. и др. Физика взрыва. Под ред. Л.П. Орленко. М.: Физматлит, 2002, Т.1,2.
9. Димитриенко Ю.И. Анизотропная теория конечных упруго-пластических деформаций.- Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Естественные науки.- №2.-2003.- с.47-61.
10. Димитриенко Ю.И., Воронцова М.А., Страхова Е.А. Численное моделирование процессов детонации и кумуляции в перспективных кумулятивных системах.- В. Сб. Аэрокосмические технологии. -М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана.- 2004, с. 116-118.

УДК 539.3

Ю.И. Димитриенко, М.Ю. Иванов

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА В ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМАХ

Предложена методика решения локальных задач газовой динамики на ячейке периодичности, основанная на применении метода асимптотического осреднения. Сформулированы условия существования периодических решений.

1. Введение. Создание демпфирующих устройств, работа которых основана на поглощении энергии за счет фазовых превращений, привело к необходимости моделирования нелинейных высокоскоростных течений жидкости в гетерогенных системах. Такие процессы в настоящее время полностью еще не изучены. В отличие от линейных задач [1], характерных для медленных процессов переноса, при высокоскоростных течениях возникают нелинейные связанные локальные и глобальные задачи переноса [2–4]. Существующие расчетные методы локальных потоков [5] не учитывают, например, периодичности течения в ячейках периодичности гетерогенной системы, а также влияние геометрической формы области течения. В данной работе предложен подход к решению локальных задач переноса, основанный на модели асимптотических приближений.

2. Математическая постановка задачи. Рассматривается пористый материал периодической структуры (рис. 1), занимающий область V, поры которого заполнены вязкой сжимаемой совершенной жидкостью (газом). Вводятся следующие параметры: l_0 – характерный линейный размер ячейки периодичности (ЯП) V_ξ, x_0 – характерный глобальный размер всей пористой области V, t_0 – характерное время, характерная скорость $v_0 = x_0/t_0$, а также малый параметр $\kappa = l_0 / x_0$, $\kappa << 1$, безразмерные локальные координаты $\boldsymbol{\xi} = \overline{\mathbf{x}}/\kappa$ (рис. 2), изменяющиеся в пределах ячейки периодичности V_ξ, и глобальные координаты $\overline{\mathbf{x}} = \mathbf{x}/x_0$. Движение вязкого нетеплопроводного газа в пористой среде в рамках сделанных допущений описывается системой уравнений Навье-Стокса:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla_{\bar{x}} \cdot \rho \mathbf{v} = 0, \quad \dfrac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} + \nabla_{\bar{x}} \cdot (\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v} + p\mathbf{E}) = \nabla_{\bar{x}} \cdot \boldsymbol{\sigma}_v; \\ \dfrac{\partial}{\partial t} \rho \left(e + \dfrac{v^2}{2} \right) + \nabla_{\bar{x}} \cdot \rho \mathbf{v} \left(e + \dfrac{v^2}{2} + \dfrac{p}{\rho} \right) = \nabla_{\bar{x}} \cdot (\boldsymbol{\sigma}_v \cdot \mathbf{v}); \\ \boldsymbol{\sigma}_v = \mu_1 (\nabla_{\bar{x}} \cdot \mathbf{v}) \mathbf{E} + \mu_2 \left(\nabla_{\bar{x}} \otimes \mathbf{v} + \nabla_{\bar{x}} \otimes \mathbf{v}^T \right); \\ p = R\rho\theta, \quad e = c_V \theta, \quad \mathbf{v}\big|_{\Sigma} = 0, \end{cases} \tag{1}$$

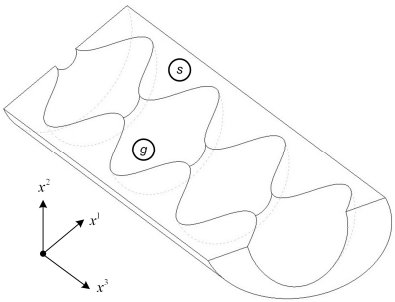


Рис. 1. Модель периодической структуры

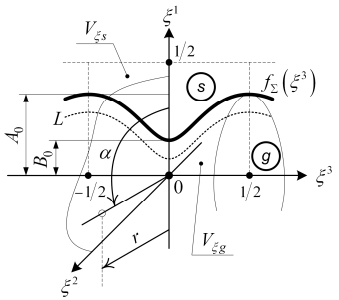


Рис. 2. Схематичный вид ЯП V_ξ

где $\rho, \mathbf{v}, v, p, e, \theta$ – плотность, вектор и модуль скорости, давление, внутренняя энергия и температура жидкости соответственно, $\boldsymbol{\sigma}_v$ – тензор вязких напряжений, μ_1, μ_2 – коэффициенты вязкости, которые полагаются «малыми» $\left(\mu_\alpha = \mu_\alpha^0 \kappa^2\right)$, c_V, R – теплоемкость при постоянном объеме и газовая постоянная соответственно, $\nabla_{\bar{x}}$ – оператор Гамильтона по координатам $\bar{\mathbf{x}}$. Последнее равенство в системе (1) есть условие прилипания частиц жидкости на твердой поверхности. Все функции $\Omega = \{\rho, \mathbf{v}, \theta, \ldots\}$, входящие в систему (1), полагаются квазипериодическими, т.е. зависят от трех аргументов: $\Omega = \Omega(\bar{\mathbf{x}}, \boldsymbol{\xi}, t)$, $\boldsymbol{\xi} \in V_\xi$, $\bar{\mathbf{x}} \in V$, являются 1-периодическими по второму аргументу $\boldsymbol{\xi}$.

Введем оператор среднего значения $\langle \cdot \rangle$ по ЯП V_ξ от квазипериодических по локальным координатам $\boldsymbol{\xi} \in V_\xi$ функций Ω [2]:

$$\langle \Omega \rangle = \frac{1}{\varphi_g |V_\xi|} \int_{V_{\xi g}} \Omega d\tilde{V}_{\xi g}, \quad \varphi_g = \frac{1}{|V_\xi|} \int_{V_{\xi g}} d\tilde{V}_{\xi g}, \tag{2}$$

где φ_g – объемная доля жидкости в ЯП, $|V_\xi|$ – объем ЯП V_ξ.

В соответствии с методом асимптотического осреднения [3, 6] функции системы уравнений (1) представляются асимптотическими рядами по малому параметру κ :

$$\Omega\left(\overline{\mathbf{x}},\boldsymbol{\xi},t\right)=\Omega^{(0)}\left(\overline{\mathbf{x}},\boldsymbol{\xi},t\right)+\kappa\Omega^{(1)}\left(\overline{\mathbf{x}},\boldsymbol{\xi},t\right)+\kappa^2\Omega^{(2)}\left(\overline{\mathbf{x}},\boldsymbol{\xi},t\right)+\ldots. \qquad (3)$$

С помощью асимптотических разложений (3) и правила дифференцирования сложной функции из системы (1) получаем локальную задачу газовой динамики на ЯП [3, 4]:

$\nabla_{\xi}\cdot\mathbf{T}=0,$ где

$$\mathbf{T}=\left(\rho^{(0)}\mathbf{v}^{(0)},\rho^{(0)}\mathbf{v}^{(0)}\otimes\mathbf{v}^{(0)}+p^{(0)}\mathbf{E},\left(\rho^{(0)}\left(c_g\theta^{(0)}+\frac{\nu^{(0)2}}{2}\right)+p^{(0)}\right)\mathbf{v}^{(0)}\right)^T; \qquad (4)$$

$$p^{(0)}=R\rho^{(0)}\theta^{(0)},\ \left\langle\rho^{(0)}\mathbf{v}^{(0)}\right\rangle=\overline{\rho}\overline{\mathbf{v}}\left(\overline{\mathbf{x}},t\right),\ \left\langle\rho^{(0)}\right\rangle=\overline{\rho}\left(\overline{\mathbf{x}},t\right),$$

$$\left\langle\theta^{(0)}\right\rangle=\overline{\theta}\left(\overline{\mathbf{x}},t\right);\ \mathbf{v}^{(0)}\cdot\mathbf{n}^{(0)}=0,\ \boldsymbol{\xi}\in\Sigma_{\xi sg},$$

в которой неизвестными функциями являются плотность $\rho^{(0)}$, вектор скорости $\mathbf{v}^{(0)}$ и температура $\theta^{(0)}$ в нулевом приближении, $\mathbf{n}^{(0)}$ – вектор нормали к межфазной поверхности $\Sigma_{\xi sg}$. Решение задачи (4) ищется только на ЯП, поэтому кроме условий на твердой поверхности она содержит условия периодичности, вследствие «малости» вязкости эта задача не содержит вязких напряжений, т.е. она представляет собой задачу для уравнений Эйлера, и является задачей для установившихся процессов, т.е. не содержит производных по времени. Кроме того, в задаче (4) содержатся интегральные условия на средние значения функций, которые являются внешними данными этой задачи [3]. Предлагается следующий численно-аналитический метод решения локальной задачи (4).

3. Осесимметричная локальная задача. На ячейке периодичности V_{ξ} введем цилиндрические локальные координаты: r, α, z, связанные с декартовыми координатами ξ^i известным образом: $\xi^1=r\cos\alpha,\ \xi^2=r\sin\alpha,\ \xi^3=z$ ($\mathbf{e}_r,\mathbf{e}_{\alpha},\mathbf{e}_z$ – физический базис цилиндрической системы координат). Положим, что пора в ЯП имеет осесимметричную форму с осью симметрии *Oz* и обозначим $r=f_{\Sigma}(z)$ – функцию формы поверхности $\Sigma_{\xi sg}$ контакта жидкости с твердым телом в ЯП (рис. 2). Тогда решение задачи (4) также будет обладать осевой симметрией и зависеть от координат r и z. Отметим, что система уравнений Эйлера (4) допускает два первых интеграла – адиабату Пу-

ассона и интеграл Бернулли вдоль линии тока L. Поэтому задача (4) может быть преобразована к следующему виду:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial(\tilde{\rho}\tilde{v}_z)}{\partial z}+\dfrac{\partial(\tilde{\rho}\tilde{v}_r)}{\partial r}+\dfrac{\tilde{\rho}\tilde{v}_r}{r}=0,\ \left(\dfrac{\partial\tilde{v}_r}{\partial z}-\dfrac{\partial\tilde{v}_z}{\partial r}\right)\tilde{v}_z=\dfrac{\partial\tilde{i}^*}{\partial r}, \\ -\left(\dfrac{\partial\tilde{v}_r}{\partial z}-\dfrac{\partial\tilde{v}_z}{\partial r}\right)\tilde{v}_r=\dfrac{\partial\tilde{i}^*}{\partial z}; \\ \dfrac{\tilde{v}^2}{2}+\gamma_1\tilde{\theta}=\dfrac{\tilde{v}_*^2}{2}+\gamma_1\tilde{\theta}^*=\tilde{i}^*,\ \dfrac{\tilde{p}}{\tilde{p}^*}=\dfrac{\tilde{\rho}\tilde{\theta}}{\tilde{\rho}^*\tilde{\theta}^*},\ \dfrac{\tilde{\theta}}{\tilde{\theta}^*}=\left(\dfrac{\tilde{\rho}}{\tilde{\rho}^*}\right)^{\gamma-1}; \\ \left\langle\tilde{\rho}\tilde{v}_r\right\rangle=0,\ \left\langle\tilde{\rho}\tilde{v}_z\right\rangle=\bar{M},\ \left\langle\tilde{\rho}\right\rangle=1,\ \left\langle\tilde{\theta}\right\rangle=1,\ \left(\tilde{v}_r n_r+\tilde{v}_z n_z\right)\big|_{\Sigma_{\xi sg}}=0, \end{cases} \tag{5}$$

в которой $\tilde{\rho}=\rho^{(0)}/\bar{\rho}$, $\tilde{\theta}=\theta^{(0)}/\bar{\theta}$, $\tilde{v}_r=v_r^{(0)}/\bar{a}$, $\tilde{v}_z=v_z^{(0)}/\bar{a}$, где $v_r^{(0)}$ – радиальная, $v_z^{(0)}$ – осевая составляющие вектора скорости $\mathbf{v}^{(0)}$. $\gamma_1=\gamma/(\gamma-1)$ (γ – показатель адиабаты). $\bar{M}=\bar{v}_z/\bar{a}$, где $\bar{v}_z$ – осевая составляющая вектора скорости $\bar{\mathbf{v}}(\bar{\mathbf{x}},t)$, $\bar{a}$ – осредненная скорость звука, для которой $\bar{a}=\sqrt{R\bar{\theta}}$, $\tilde{p}^*,\tilde{\rho}^*,\tilde{\theta}^*,\tilde{v}_*,\tilde{i}^*$ – постоянные интегрирования, входящие в число неизвестных и зависящие от линии тока *L*. Интегральное условие $\left\langle\tilde{\rho}\tilde{v}_r\right\rangle=0$ связано с одноканальной структурой пор,

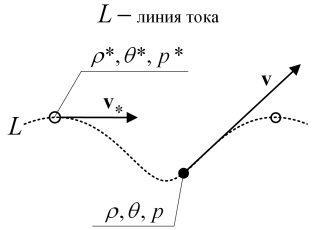


Рис. 3. Линия тока установившегося течения в ЯП V_ξ

так как $\bar{v}_r=0$. Первое уравнение системы (5) – это уравнение неразрывности, второе и третье – проекции уравнения установившегося движения жидкости в форме Громеки-Лемба, четвертое – интеграл Бернулли, пятое и шестое – адиабата Пуассона и уравнение баротропии, являющиеся следствием уравнения энергии и уравнения состояния системы (4). Полученная задача параметрически зависит только от двух величин: безразмерного числа Маха $\bar{M}$, являющегося следствием решения глобальной задачи [3], и константы γ_1.

Пусть L – линия тока частиц жидкости в ЯП V_ξ (рис. 3). Выберем в качестве значений $\tilde{p}^*, \tilde{\rho}^*, \tilde{\theta}^*, \tilde{v}_*, \tilde{i}^*$ газодинамические параметры при $z = -1/2$. Тогда вдоль линии тока L из уравнений системы (5) имеем: $\theta = \theta^* G(v)$, $p = p^* H(v)$, $\rho = \rho^* \tilde{F}(v)$, $\rho^* = \rho F(v)$, где $F(v) = \left(\left(\tilde{v}_{\max}^2 - v_*^2\right) / \left(\tilde{v}_{\max}^2 - v^2\right)\right)^{1/(\gamma-1)}$, $\tilde{F}(v) = 1/F(v)$, $G(v) = \left[F(v)\right]^{1-\gamma}$, $H(v) = \left[F(v)\right]^{-\gamma}$, $\tilde{v}_{\max} = \sqrt{2\gamma_1 \theta^* + v_*^2}$ (символ «~» для простоты опущен). С использованием равенств $\theta^* \left\langle G(v) \right\rangle_g = 1$, $\rho^* \left\langle \tilde{F}(v) \right\rangle_g = 1$, вытекающих из предыдущих соотношений и интегральных условий системы (5), и $S = \bar{Q} F(v) / (\rho^* v)$, где S – площадь ортогонального к оси Oz сечения области $V_{\xi g}$, $\bar{Q}$ – массовый расход жидкости, можно получить систему уравнений относительно θ^*, v_* и функции $v = v(z)$:

$$\begin{cases} \bar{M} \left| V_{\xi g} \right| - \dfrac{v_* S(-1/2)}{\left\langle \tilde{F}(v) \right\rangle_g} = 0, \ \bar{M} \left| V_{\xi g} \right| F(v) - \dfrac{vS}{\left\langle \tilde{F}(v) \right\rangle_g} = 0; \\ 1 - \theta^* \left\langle G(v) \right\rangle_g = 0. \end{cases} \qquad (6)$$

После определения θ^*, v_* и v находятся ρ^* и p^*:

$$\rho^* = 1 / \left\langle \tilde{F}(v) \right\rangle_g, \ p^* = \rho^* c_p \theta^* \frac{\gamma - 1}{\gamma}. \qquad (7)$$

где c_p – безразмерная теплоемкость жидкости при постоянном давлении. После нахождения модуля скорости v компоненты вектора скорости $\mathbf{v}$ в каждой точке линии тока L могут быть найдены по формулам:

$$v_r(r,z) = \frac{v(z)}{\sqrt{1 + (f_r'(z))^2}}, \ v_z(r,z) = \frac{v(z) f_r'(z)}{\sqrt{1 + (f_r'(z))^2}}, \qquad (8)$$

где $f_r(z)$ – уравнение линии тока L.

Анализ решения локальной задачи. В зависимости от геометрии области $V_{\xi g}$, величины числа Маха $\bar{M}$ и коэффициента адиабаты γ можно получать различные решения локальной задачи (5): дозвуковое и сверхзвуковое. Если в области $V_{\xi g}$ реализуется дозвуковой режим те-

чения, то скорости частиц жидкости лежат на левой ветви $S(v)$, газодинамические параметры суть периодические функции по локальной координате z (рис. 4.1). Если же имеет место переход (рис. 4.2), т.е. течение в области $V_{\xi g}$ становится сверхзвуковым, то периодического решения локальной задачи (5) не существует. Наличие этого перехода определяется значением массового расхода $\overline{Q}$ и функцией $S(z)$.

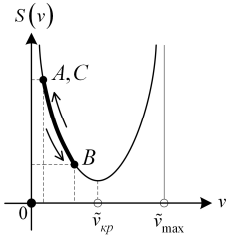


Рис. 4.1. Дозвуковое решение

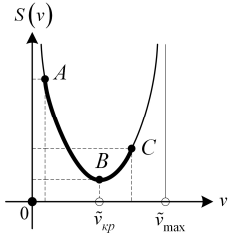


Рис. 4.2. Сверхзвуковое решение

4. Пример численного решения. В качестве примера численной реализации метода была рассмотрена пористая среда, поры которой заполнены воздухом. Для него имеем $c_p = 1{,}006$ кДж/(кг·К), $\gamma = 1{,}2$, $R = 0{,}168$ кДж/(кг·К). Характерные геометрические и газодинамические параметры были выбраны следующими: $x_0 = 1$ м, $t_0 = 1$ с, $v_0 = x_0/t_0$, плотность $\rho_0 = 10$ кг/м^3, температура $\theta_0 = 293{,}15$ К, давление $p_0 = \rho_0 v_0^2$. Функция формы f_Σ поровой области $V_{\xi g}$ была выбрана в следующем виде: $f_\Sigma(z) = \frac{A_0 + B_0}{2} - \frac{A_0 - B_0}{2}\cos(2\pi z)$, где $z \in [-1/2; 1/2]$; $A_0 = const$, $B_0 = const$, для которых $0 < B_0 \le A_0 \le 1/2$. Обозначим: V_1 – область, в которой локальная задача (5) не имеет периодического решения; V_2 – область существования периодического решения; V_3 – нерасчетная область. На рис. 5.1 и 5.2 на плоскости значений (A_0, B_0) геометрических параметров поры показаны области существования периодического решения задачи (5) при $\gamma_1 = 6$ и осредненных числах Маха $\overline{M} = 0{,}1$ и $\overline{M} = 0{,}3$. Из этих рисунков видно, что уменьшение площади критического сечения поровой области $V_{\xi g}$ при увеличении числа

Маха $\bar{M}$ приводит к сужению области, в которой задача (5) имеет периодическое решение.

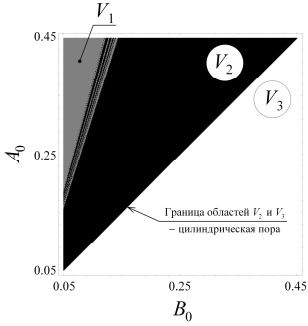


Рис. 5.1. $\bar{M} = 0{,}1$

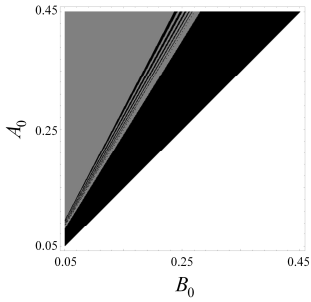


Рис. 5.2. $\bar{M} = 0{,}3$

5. Выводы. Предложен метод решения локальной задачи газовой динамики для периодически-пористой газонаполненной среды, который позволяет вычислять параметры газового потока в отдельной поре в зависимости от скорости движения осредненного газового потока и геометрии поры. Установлено, что в зависимости от геометрической формы пор возможно существование как дозвуковых, так и сверхзвуковых режимов движения локального потока, а трансзвуковой режим не возможен.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Димитриенко Ю.И., Глазиков М.Л. Разработка метода асимптотического осреднения для решения задач газовой динамики в пористых средах. – В Сб. Математика в современном мире/Под ред. Ю.А.Дробышева. – Калуга: Изд-во КГПУ. –2004 г. –С.163–177.
2. Димитриенко Ю.И. Механика композиционных материалов при высоких температурах. – М.: Машиностроение, 1997. – 368 с., ил.
3. Dimitrienko Yu.I. Dynamic Transport Phenomena in Porouse Polymer Materials Under Impuls Thermal Effects. – Transport in Porouse Media. – V.35. – 1999. – P.299 – 326.
4. Ю.И. Димитриенко, М.Ю. Иванов. Разработка численного метода решения локальной задачи нелинейной фильтрации в периодических пористых средах. – В Сб. Современные естественно-научные и гуманитарные проблемы. – М.: Логос, 2005. – С.469-477.
5. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. I. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 464 с.
6. Санчес-Паленсия Э. Неоднородные среды и теория колебаний: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 472 с., ил.

УДК 519.63

С.Н. Дмитриев, И.Ю.Калугин

ПОСТРОЕНИЕ СОКРАЩЁННОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ В СТАНДАРТНОЙ ФОРМЕ МЕТОДА КОНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА

Предложен метод построения сокращенной динамической модели по точности несколько превосходящий классический метод Гайана-Айронса и по форме совпадающий с уравнениями метода конечного элемента

1. Введение. В статических и динамических расчетах конструкций с применением конечно-элементного моделирования часто используют процедуры, целью которых является снижение порядка матриц жесткости и массы. В статических задачах снижение достигается благодаря методу суперэлементов [1, 2], который алгебраически эквивалентен исключению части неизвестных и в этом смысле может рассматриваться как точный. Исключение части степеней свободы приводит к некоторой приближенной сокращенной динамической модели. Для получения таких моделей используются методы динамической конденсации, получившие общее название метода синтеза форм колебаний. Среди них отметим метод свободных границ [3] и метод жёстких границ [4, 5], в которых для получения сокращенной динамической модели системы используются формы колебаний ее при свободных и жёстко закреплённых границах соответственно.

Простейшим вариантом метода динамической конденсации является метод Гайана-Айронса [6], в котором исключение части перемещений и конденсация матриц жесткости и массы осуществляется без использования форм колебаний. Для преобразований матриц жесткости и массы применяются только, так называемые, статические формы. Внешне уравнения сокращенной динамической модели получаются такими же, как исходные, то есть представляют собой стандартную конечно-элементную формулировку, содержащую в векторе состояний только физические перемещения. Применение метода свободных или жестких границ дает вектор состояний, включающий в себя помимо физических перемещений координаты форм, а так же уравнения по своей форме, отличающиеся от стандартной конечно-элементной модели метода жесткостей. В настоящей работе представлен метод, не совпадающий с методом Гайана-Айронса, в котором вектор состояний так же содержит только физические перемещения и

уравнения по форме совпадают с обычными уравнениями метода жесткостей.

2. Предлагаемый метод является модификацией метода работы [7], в которой устранены ограничения для незакрепленных в пространстве систем. Рассмотрим его.

Пусть $\left[\bar{K}\right]=\begin{bmatrix}\bar{K}_{11} & \bar{K}_{12}\\ \bar{K}_{21} & \bar{K}_{22}\end{bmatrix}$ – полная матрица жёсткости элемента. $\left[K_{11}\right]...\left[K_{22}\right]$ – блоки матрицы жёсткости, индекс 1 соответствует удерживаемым перемещениям, 2 – отбрасываемым; $\left[K\right]$ и $\left[M\right]$ – соответственно матрицы $n\times n$ жёсткости и массы, после приведения (редукции), n – число удерживаемы степеней свободы; ω_i – собственные круговые частоты системы при незакреплённых границах; $\{\phi_i\}$ – векторы, составленные из значений форм колебаний только в сохраняемых узлах, i – номер тона колебаний; $\left[F\right]$ – матрица форм, в которой вектора $\{\phi_i\}$ расположены по столбцам.

Уравнения алгоритма после их приведения должны давать более точное решение статической задачи, поэтому в качестве приведённой матрицы жёсткости примем матрицу, полученную из полной матрицы жёсткости путём статической редукции (так же как и в методе Гайана-Айронса) [2]:

$$\left[K\right]=\left[\bar{K}_{11}\right]-\left[\bar{K}_{12}\right]\left[\bar{K}_{22}\right]^{-1}\left[\bar{K}_{21}\right]. \qquad (1)$$

Потребуем, чтобы сокращенная динамическая модель после приведения имела те же собственные частоты и формы колебаний, что и до приведения. Тогда для каждого из *n* низших тонов должно выполняться соотношение Релея:

$$\omega_i^2=\frac{\{\varphi_i\}^T\left[K\right]\{\varphi_i\}}{\{\varphi_i\}^T\left[M\right]\{\varphi_i\}}. \qquad (2)$$

Введём обозначение:

$$\beta_i=\{\varphi_i\}^T\left[M\right]\{\varphi_i\} \qquad (3)$$

и вычислим β_i с помощью (2)

$$\beta_i=\frac{\{\varphi_i\}^T\left[K\right]\{\varphi_i\}}{\omega_i^2},\quad i=1,2,...n. \qquad (4)$$

Для тонов смещений системы как жесткого целого (4) представляет собой неопределенность (нуль на нуль). В этом случае можно по-

требовать для них выполнения условия нормирования по редуцированной матрице массы $[M]$ и положить согласно (3) $\beta_i = 1$, а для остальных тонов определять β_i по формуле (4).

Объединяя (4) с условиями ортогональности собственных форм по массе приходим к:

$$[F]^T [M][F] = [B], \text{ где } [B] = diag[\beta_1, ...\beta_n]. \qquad (5)$$

Полагая $[F]$ неособенной матрицей, получим приведённую матрицу:

$$[M] = [F]^{-T} [B][F]^{-1}.$$

Формы колебаний теперь могут быть нормированы по приведённой матрице масс согласно условию:

$$[\Phi]^T [M][\Phi] = [I],$$

где $[I]$ - единичная матрица, $[\Phi]$ - матрица $[F]$ после нормирования.

При вычислении матрицы масс в данном методе используется обращение несимметричной матрицы. Однако расчёт легко сводится к использованию операций над симметричными матрицами.

Обозначим $[\bar{F}] = [F][F]^T$. $[\bar{F}]$, очевидно, симметричная матрица. Тогда соотношение (5) записывается в виде:

$$[F][F]^T [M][F][F]^T = [F][B][F]^T$$

Отсюда $[M] = [\bar{F}]^{-1} [\bar{B}][\bar{F}]^{-1}$, где $[\bar{B}] = [F][B][F]^T$.

3. Тестовая задача. Формулы, полученные в работе, были проверены на тестовой задаче о колебаниях балки. Рассмотрена конечно-элементная модель балки, содержащая 101 узел и 101 степень свободы. (Исключались углы поворота, которые считались безинерционными степенями свободы). Вычислялись значения частот и форм колебаний для исходной модели и для сокращенной динамической модели при 11 удерживаемых степенях свободы. Сравнение проводилось для свободной и шарнирно опертой по концам балки. Параметры балки: длина L = 1 м, размеры сечения – квадрат 0.01 м × 0.01 м, материал E = $0.7 \cdot 10^{11}$ Па, ρ=2700 кг/ м^3.

Предлагаемый метод обеспечивает равенство частот и форм колебаний по удерживаемым степеням свободы для исходной и сокращенной модели. Поэтому в приводимых ниже таблицах и графиках получаем полное совпадение результатов, в то время как метод Гайана-Айронса дает заметную погрешность по частоте для высших тонов колебаний сокращенной модели.

В сокращённых динамических моделях, при расчете как предлагаемым методом, так методом Гайана-Айронса, удерживается одинаковое число узлов. Распределение узлов равномерное – удержаны узлы 1, 11, 21, 31, 41, 51, 61, 71, 81, 91, 101.

Таблица 1

Собственные частоты, Гц, свободная балка:

f_1, f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9	f_{10}	f_{11}
Аналитическое решение [8]									
0	52.33	144.27	282,86	467,54	698,47				
Метод конечного элемента, 100 элементов, 101 узел									
0	52.3	144	283	467	698	974	1300	1670	2080
Сокращённая динамическая модель (предлагаемый метод)									
0	52.3	144	283	467	697	974	1290	1670	2080
Сокращённая динамическая модель (по Гайану-Айронсу)									
0	52.3	144	283	470	707	1000	1360	1770	2150

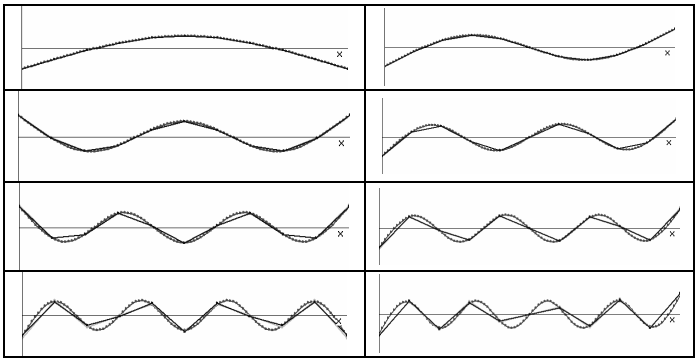


Рис.1. Сравнение форм собственных форм колебаний свободной балки

Гладкие графики, приведенные на рис.1, соответствуют полной конечно-элементной модели. На графиках форм колебаний видно, что в сохраняемых узлах значения совпадают. Характер же изменения между узлами, который наблюдается в исходной конечно-элементной модели, не может быть воспроизведен в сокращенной модели. Различия в формах колебаний, найденных предлагаемым методом и методом Гайана-Айронса невелики. При шарнирно опертой балке предла-

гаемый метод дает несколько лучшую точность, как по частотам, так и по формам колебаний.

4. Выводы. Предложен метод построения сокращенной динамической модели. Выполнены расчеты тестового примера колебаний свободной балки. Результаты показали, что по точности предлагаемый метод несколько превосходит классический метод Гайана-Айронса, а по форме совпадает с уравнениями метода конечного элемента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Постнов В.А., Дмитриев С.А., Елтышев Б.К., Родионов А.А. Метод суперэлементов в расчётах инженерных сооружений. – Л., «Судостроение», 1979. – 287 с.
2. Пржеминицкий Е.С. Матричный метод исследования конструкций на основе анализа подструктур // Ракетная техника и космонавтика – 1963. – Т. 1, №1. – С. 165-174.
3. Крэйг мл., Бэмптон. Сочленение подконструкций при динамическом расчёте конструкций // Ракетная техника и космонавтика. – 1968. – Т. 6, №7. – С. 113-121.
4. Голдмен. Исследование колебаний методом расчленения // Ракетная техника и космонавтика. – 1969. – Т. 7, №6. – С. 191-193.
5. Крэйг мл., Чжан. Методы свободных границ для связывания субконструкций при исследовании динамики // Ракетная техника и космонавтика. – 1976. – Т. 14, №11. – С. 154-156.
6. Гайан. Приведение матриц жёсткости и массы // Ракетная техника и космонавтика. – 1965. – Т. 3, №2. – С. 287.
7. Дмитриев С.Н. Об одном варианте метода свободных границ. №6061-83 Деп. от 14.11.83. «Депонированные рукописи» – 1984. №3, б/о 696.
8. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. – М.: «Наука». – 1967. 444 с.

УДК 539.3

С.Н. Дмитриев, С.Ю. Солодовникова

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОГО И ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ СЕТЧАТОГО СТЕКЛОПОЛОТНА

Предложен геометрически нелинейный конечный элемент для моделирования сетчатого полотна с учетом начального натяжения. Разработана программа, включающая в себя алгоритм генерации исходных данных. Приведены примеры расчета, иллюстрирующие ее работоспособность.

1. Введение. Сетчатое стеклополотно используется в качестве несущего элемента в конструкциях космической техники, в частности для крепления фотоэлементов солнечных батарей. При этом полотно воспринимает поперечную нагрузку за счет предварительного натяжения. Для расчета статического и динамического нагружения предлагается конечно-элементная модель.

2. Конечный элемент нити (рис. 1) представляет собой геометрически нелинейную двухузловую ячейку, работающую только на растяжение. Учитывается начальное натяжение.

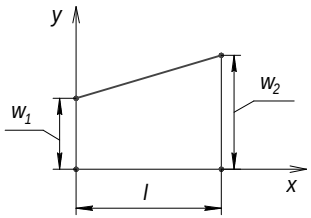


Рис.1. Конечный элемент нити

Так как рассматриваются только поперечные перемещения сетевого полотна, то длину элемента нити после деформации можно определить как: $l^* = \sqrt{l^2 + (w_2 - w_1)^2}$. Тогда с учетом малости перемещений деформация элемента:

$$\varepsilon = \frac{l^* - l}{l} = \frac{1}{2l^2}(w_2 - w_1)^2$$

3. Матрицы масс и жесткостей конечного элемента получаем, используя уравнение Лагранжа II рода.

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial E}{\partial \dot{q}_i}\right)-\frac{\partial E}{\partial q_i}+\frac{\partial U}{\partial q_i}=Q_i$$

где E, U – кинетическая и потенциальная энергия; q_i и Q_i – обобщенная координата и обобщённая сила соответственно. Обобщенными координатами и обобщенными силами являются узловые перемещения и узловые силы. Внутренняя сила складывается из силы предварительного натяжения T_0 и силы деформации, связанной с перемещениями узловых точек в поперечном направлении:

$$T = T_0 + EF\varepsilon ,$$

где E – модуль Юнга; F – площадь сечения нити.

Энергия деформации конечного элемента:

$$U = T_0\varepsilon \cdot l + \frac{1}{2}EF\varepsilon^2 l = \frac{1}{2l}T_0(w_2 - w_1)^2 + \frac{1}{8l^3}EF(w_2 - w_1)^4 .$$

Производные по обобщенным координатам дают обобщенные силы:

$$P_1 = \frac{T_0}{l}(w_1 - w_2) + \frac{EF}{2l^3}(w_1 - w_2)^3, \quad P_2 = \frac{T_0}{l}(w_2 - w_1) + \frac{EF}{2l^3}(w_2 - w_1)^3.$$

Отсюда – линейная и нелинейная части матрицы жесткости (1):

$$[K_{lin}] = \frac{T_0}{l}\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \qquad [K_{nl}] = \frac{EF}{2l^3}(w_1 - w_2)^3\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}. \tag{1}$$

4. Линеаризация. Для применения в дальнейшем метода малых нагружений [1] получим линеаризованные (в окрестности некоторого текущего состояния) соотношения. Введем обозначение:

$$\delta = w_2 - w_1 = \delta_0 + \Delta\delta = (w_{20} - w_{10}) + (\Delta w_2 - \Delta w_1) .$$

С учетом малости $\Delta\delta$, проводим линеаризацию:

$$\delta^3 \approx {\delta_0}^3 + 3{\delta_0}^2\Delta\delta = {\delta_0}^3 + 3{\delta_0}^2(\delta - \delta_0) = 3{\delta_0}^2\Delta\delta - 2{\delta_0}^3 .$$

В итоге получаем нелинейную часть матрицы жесткости (2) и дополнение к вектору правой части (3):

$$[K_{nl}] = \frac{3EF}{2l^3}(w_{20} - w_{10})^2\begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \tag{2}$$

$$\frac{EF}{l^3}\begin{bmatrix} (w_{10} - w_{20})^3 \\ (w_{20} - w_{10})^3 \end{bmatrix} = \frac{EF}{l^3}(w_{10} - w_{20})^3\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}. \tag{3}$$

Для получения матрицы масс $[M]$ зададим распределение скоростей по нити с помощью функций формы N_1 и N_2:

$$\dot{w}(x) = \dot{w}_1 N_1 + \dot{w}_2 N_2 \text{ , где } \; N_1 = 1 - \frac{x}{l}, \; N_2 = \frac{x}{l} \; .$$

Тогда, кинетическая энергия элемента нити равна:

$$E = \frac{\rho F}{2}\int_0^l (\dot{w}_1 N_1 + \dot{w}_2 N_2)^2 dx .$$

Взяв производные от кинетической энергии по соответствующим координатам, получим:

$$[M] = \frac{\rho F l}{6}\begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}$$

5. Алгоритм генерации данных. Использование рассматриваемой конечно-элементной модели требует задания очень большого объема исходных данных. Для этой цели предлагается следующий алгоритм генерации данных об узловых точках и конечных элементах, образующих сетевое полотно.

Предполагается, что сетевое полотно имеет тканевое плетение с различными по направлению нитями. Разделим нити на два семейства в зависимости от угла их наклона (рис.2):

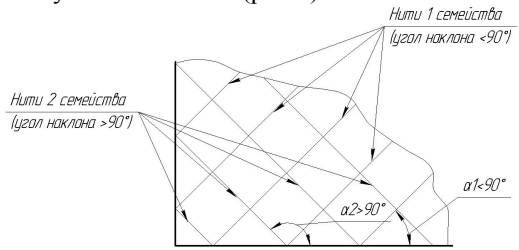


Рис. 2. Семейства нитей

6. Исходные данные для построения конечно-элементной сетки: $\{x, y : x \in [0, a], y \in [0, b]\}$ – область определения сетки (a – длина и b –ширина полотна). Для ν -го семейства ($\nu = 1, 2$): x_ν – координата любой нити ν -го семейства при y = 0; α_ν – угол наклона нитей; h_ν – шаги нитей по координате *x*.

Предполагаем, что все нити сетки прямые. Тогда нити первого $(\nu = 1)$ и второго $(\nu = 2)$ семейств описываем уравнением:

$$y = k_\nu (x - x_\nu), \quad k_\nu = tg\alpha_\nu > 0, \quad \nu = 1, 2$$

Найдём уравнение граничных прямых (нитей), попадающих в область определения, и пронумеруем их в порядке возрастания координаты *x*. Рассмотрим прямые первого семейства. В области определения для них должно выполняться неравенство: $k_1(x - x_1) \le b$. Принимая x = 0, получим: $-k_1 x_1 \le b \Rightarrow x_1 \ge -|b/k_1|$, где $x_1 < 0$.

Для нахождения x_{10} – координаты граничной левой нити первого семейства, нужно уменьшать x_1 с шагом h_1, до тех пор, пока неравенство не перестанет выполняться. Для правой граничной нити первого семейства должно выполняться неравенство: $x \le a \Rightarrow x_{1K}$. Для всех прямых второго семейства, попадающих в область определения, должно выполняться неравенство: $k_2(x - x_2) \le b$. Принимаем $x = 0$, получим, что: $-k_2 x_2 \le b \Rightarrow x_1 \le \left| b/k_2 \right|$, где $x_2 > 0$. Для нахождения x_{20} – координаты правой граничной нити второго семейства, нужно увеличивать x_{2K} с шагом h_2, пока неравенство не перестанет выполняться.

Для левой граничной нити первого семейства должно выполняться неравенство: $x \ge 0 \Rightarrow x_{20}$. Число нитей первого семейства n_1 и второго семейства n_2 определяем, прогоняя значение координаты x от $x_{\nu 0}$ до $x_{\nu n_\nu}$ ($\nu = 1,2$). Уравнения прямых будем записывать в виде:

$$y = k_\nu (x - x_{\nu 0} - h_\nu (i_\nu - 1)), \quad \nu = 1,2, \quad i_\nu = \overline{1, n_\nu}.$$

7. Координаты узлов. Следующей задачей генерации данных является определение координат узлов – точек, где нити сходятся. Все узлы можно разделить на две группы: узлы, образованные пересечением нитей, и узлы, находящиеся на границах сетки.

Узлы на границах сетки при условии $x \in [0, a]$, $y \in [0, b]$:

Левая грань: $x = 0$, $y = -k_\nu (x_{\nu 0} + h_\nu (i_\nu - 1))$.

Правая грань: $x = a$, $y = k_\nu (a - x_{\nu 0} - h_\nu (i_\nu - 1))$.

Нижняя грань: $y = 0$, $x = x_{\nu 0} + h_\nu (i_\nu - 1))$.

Верхняя грань: $y = b$, $x = x_{\nu 0} + h_\nu (i_\nu - 1)) + \left(b/k_\nu \right)$.

Узлы на пересечении нитей сетки получаем из условия $y_1 = y_2$:

$$x = \left[k_1 x_{10} + k_1 h_1 (i-1) - k_2 x_{20} - k_2 h_2 (j-1) \right] \left(k_1 - k_2 \right)^{-1}.$$

Алгоритм генерации данных был реализован в среде MATLAB. В этой же среде были написаны программы вычисления матриц жесткости конечных элементов и построения глобальных матриц. Предлагаемый алгоритм генерации данных (включающий в себя нумерацию узлов) приводит к ленточному заполнению матриц.

8. Тестовые задачи. В целях подтверждения работоспособности разработанной программы были решены две задачи: задача определения собственных частот и форм колебаний предварительно натянутого сетевого полотна (в линейной постановке) и задача о статическом его нагружении сосредоточенной силой. Результаты представлены ниже.

Задача о собственных колебаниях сводится к решению обобщенной проблемы собственных значений для симметричных глобальных матриц жесткости и массы. В расчете приняты следующие характеристики: модуль упругости материала нити $E = 10^9$ Па, площадь поперечного сечения нити $F = 10^{-6}$м^2, предварительное натяжение $T_0 = 2.385\ H$. В таблице 1 приведены низшие собственные частоты и формы колебаний (см. рис.6).

Таблица 1

N	*f, Гц*	*N*	*f, Гц*	*N*	*f, Гц*	*N*	*f, Гц*
1	24,960	5	46,975	9	60,286	13	71,640
2	30,143	6	49,922	10	62,894	14	72,069
3	37,211	7	53,927	11	67,017		
4	45,289	8	54,480	12	69,620		

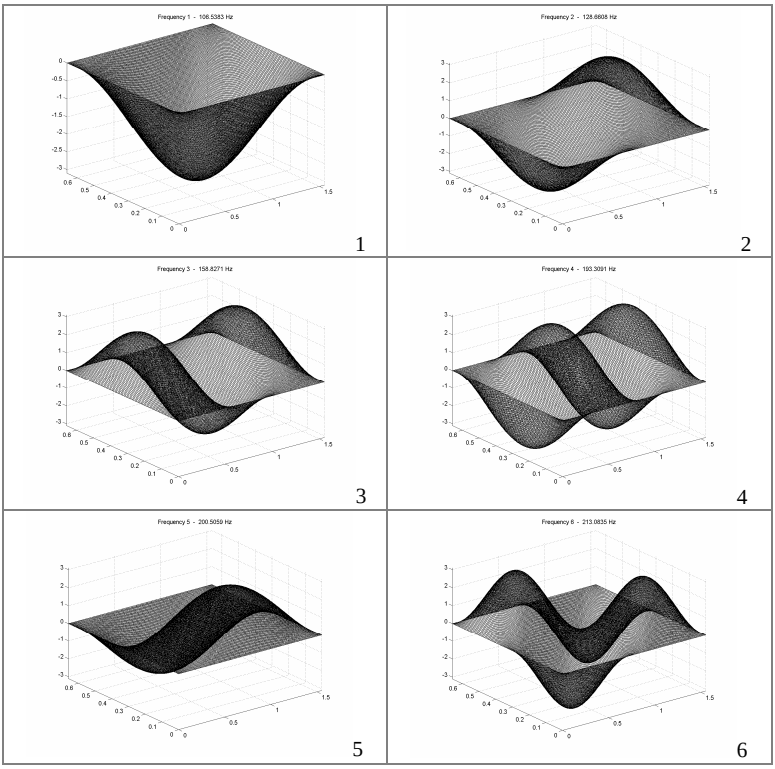


Рис. 6. Формы колебаний сетевого полотна

Задача о статическом деформировании сетчатого стеклополотна сосредоточенной силой, приложенной в центре, решалась методом малых нагружений. Как один из результатов решения этой задачи на рис.7 приведена зависимость перемещения в центре полотна от величины, приложенной силы. Полученная характеристика – нелинейная и мягкая.

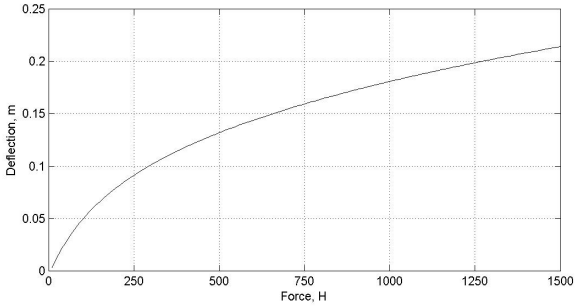


Рис. 7. Зависимость прогиба от силы

9. Выводы. Предложен геометрически нелинейный конечный элемент для моделирования сетчатого полотна с учетом начального натяжения, разработана компьютерная программа в среде MATLAB, включающая в себя алгоритм генерации исходных данных. Приведены примеры расчета собственных частот и форм колебаний предварительно натянутого сетевого полотна (в линейной постановке) и задача о статическом его нагружении сосредоточенной силой. Представленные результаты расчетов подтверждают работоспособность разработанной программы конечно-элементного моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров В.В. Метод последовательных нагружений в нелинейной теории пластинок и оболочек. Автореферат дисс. на соиск. уч. ст. д.т.н. – М., 1970 г., МИСИ им. В.И. Куйбышева.

УДК 536

Е.А. Волосюк, В.В. Горский

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ УНОСА МАССЫ ГРАФИТА В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ГАЗОВОМ ПОТОКЕ

Представлен анализ результатов численного решения автомодельных уравнений ламинарного замороженного пограничного слоя в окрестности критической точки сферы на аблирующей поверхности углерода. Использована полная термохимическая схема разрушения этого материала [1]. Параметры уноса массы графита, полученных с использованием численных решений пограничного слоя. Результаты сравниваются с аналогичными данными [2,3].

Введение. Одним из методов тепловой защиты является применение сублимирующих материалов, принцип работы которых основан на разрушении верхнего слоя ради сохранения конструкции в целом и поддержания допустимой температуры внутри аппарата. Перспективным теплозащитным материалом считается графит и композитные материалы на основе углерода. Это объясняется тем, что карбон при умеренных давлениях не образует расплава и все снесенные частицы вдуваются в пограничный слой.

Процесс разрушения графита можно разделить на этапы (по преобладающей составляющей уноса): кинетический, диффузионный, сублимационный режим.

Известно, что суммарная скорость уноса массы этого материала складывается из скорости его окисления и скорости сублимации. Типичный вид зависимости массовой скорости разрушения графита, измеренной в долях от коэффициента теплообмена на непроницаемой стенке, приводится на рис. 1.

Обычно процесс сублимации рассматривается отдельно от кинетического окисления. Впервые влияние кинетического окисления на скорость сублимации в рамках аналогии между процессами тепло – и массообмена проанализировано в работе [1], а в данной работе сделана попытка углубления и развития данных исследований.

2. Физико-математическая постановка задачи. Химический состав набегающего газового потока (воздух) характеризуется массовыми концентрациями химических элементов O, N, Ar, равными

0,231, 0,759 и 0,01 соответственно. Химический состав газовой смеси на стенке ограничен набором компонент:

$$O, O_2, N, N_2, C, C_2, C_3, CO, CO_2, CN, Ar\ .$$

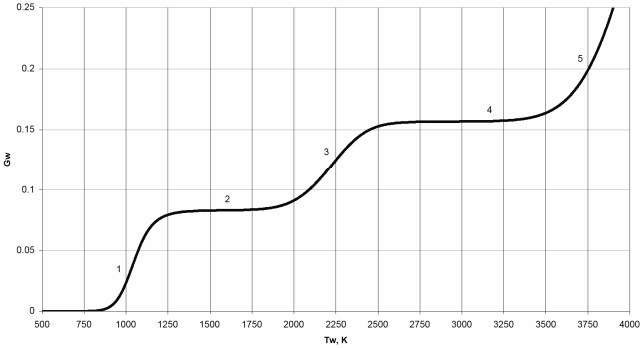


Рис. 1. Зависимость безразмерной скорости уноса массы графита от температуры поверхности: 1 – кинетическая ветвь окисления углерода до CO_2, 2 – диффузионная полка окисления углерода до CO_2, 3 – кинетическая ветвь окисления углерода до CO, 4 – диффузионная полка окисления углерода до CO, 5 – сублимационный режим.

Автомодельные уравнения многокомпонентного ламинарного замороженного пограничного слоя, записанные в переменных Лиза-Дородницына, используются в общепринятой форме:

$$\begin{cases} \left(lf_{\eta\eta}\right)_\eta = -f\cdot f_{\eta\eta} + \dfrac{1}{2}\left(f_\eta^{\,2} - \dfrac{\rho_e}{\rho}\right), \\ \left(\dfrac{\lambda}{\mu} lT_\eta\right)_\eta = -c_p f T_\eta + T_\eta \psi_e \sum\limits_i^N c_{pi} J_i, \\ \psi_e J_{i\eta} = f c_{i\eta}, \quad i = \overline{1,N}, \\ \chi_{i\eta} = \dfrac{\psi_e \mu_e \rho_e M}{\rho^2} \sum\limits_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^N \left(\dfrac{\chi_i J_j}{M_j D_{ij}} - \dfrac{\chi_j J_i}{M_i D_{ij}}\right), \quad i = \overline{1,N}, \\ \psi_e = \dfrac{1}{\sqrt{2\rho_e \mu_e \beta_e}}, \beta_e = \dfrac{du_e}{dx}. \end{cases} \tag{1}$$

$$f_\eta(0) = 0,\ f(0) = -G_w \psi_e, T(0) = T_w,\ \chi_i(0) = \chi_{i,w},\ i = \overline{1,N},$$

$$f_\eta(\eta_e) = 1, T(\eta_e) = T_e,\ \chi_i(\eta_e) = \chi_{i,e},\ i = \overline{1,N}.$$

В свою очередь, значения входящих в граничное условие на стенке параметров $G_w, T_w, \chi_{i,w}$ определяются из решения системы нелинейных алгебраических уравнений, описывающих механизм термохимического разрушения графита, учитывающего полную термохимическую модель уноса его массы. Эта система уравнений имеет вид:

$$\overline{G}_w = \overline{G}_{ox} + \overline{G}_{sub},\ \overline{G}_{ox} = \frac{\rho_w}{A_{c,0}} \cdot \left(C_{O,w} + C_{O_2,w} + C_{NO,w} + C_{CO_2,w}\right) \cdot K_w \cdot \exp\left(-\frac{E_w}{R_0 \cdot T_w}\right) \cdot \frac{M_C}{M_O},$$

$$\overline{G}_{sub} = \sum_{i=1}^{3} \frac{\zeta_i}{A_{c,0}} \cdot \frac{P^*_{C,w} - P_{C,w}}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot R_0 \cdot T_w / M_{C_i}}},$$

$$Z_O + 2Z_{O_2} + Z_{NO} + Z_{CO} + 2Z_{CO_2} = \overline{\beta}_1 \cdot Z^+_{O,e} / \left(\overline{\beta}_1 + \overline{G}_w\right),$$

$$Z_N + 2Z_{N_2} + Z_{NO} + Z_{CN} = \overline{\beta}_2 \cdot Z^+_{N,e} / \left(\overline{\beta}_2 + \overline{G}_w\right),$$

$$Z_C + 2Z_{C_2} + 3Z_{C3} + Z_{CO} + Z_{CO_2} + Z_{CN} =$$

$$= \left[\overline{\beta}_3 \cdot Z^+_{C,e} + \overline{G}_w / M_C\right] / \left(\overline{\beta}_3 + \overline{G}_w\right),$$

$$P^2_{I,w} = K_{eqI_2}\left(T_w\right) \cdot P_{O_2,w},\quad P^2_{N,w} = K_{eq,N_2}\left(T_w\right) \cdot P_{N_2,w},$$

$$P_{N,w} \cdot P_{O,w} = K_{eq,NO}\left(T_w\right) \cdot P_{NO,w},\quad P^2_{C,w} = K_{eq,C_2}\left(T_w\right) \cdot P_{C_2,w},$$

$$P^3_{C,w} = K_{eq,C_3}\left(T_w\right) \cdot P_{C_3,w},\quad P_{C,w} \cdot P_{O,w} = K_{eq,CO}\left(T_w\right) \cdot P_{CO,w},$$

$$P_{C,w} \cdot P^2_{O,w} = K_{eq,CO_2}\left(T_w\right) \cdot P_{CO_2,w},\quad P_{C,w} \cdot P_{N,w} = K_{eq,CN}\left(T_w\right) \cdot P_{CN,w},$$

$$\sum_{i=1}^{11} \overline{\beta}_i \left(c_{i,w} - c_{i,e}\right)\left(H_{i,w} - H_{12,w}\right) \cdot A_{c,0} + \overline{G}_w \cdot A_{c,0} \cdot (H_{Cs} - H_w) +$$

$$+ (H_C - H_w) \cdot \overline{A}_{c,h} \cdot A_{c,0} - \varepsilon\sigma T^4_w + Q_{add} = \frac{\overline{G}_w}{(1 - Cm)} A_{c,0} \cdot (H_{Cs} - H_{init}).$$

Входящие в эту систему уравнений значения коэффициентов тепло- и массообмена вычисляют на базе численного решения уравнений пограничного слоя по формулам:

$$\overline{A}_c = \frac{\left(A_{c,h} + A_{c,d}\right)}{A_{c,0}},\quad A_{c,h} = \frac{\lambda_w \rho_w}{\rho_e \mu_e} \overline{T}_\eta \frac{1}{\psi_e \cdot \left(H_e - H_w\right)},\qquad A_{c,d} = -\sum_{i=1}^{12} J_{d,i,w} \cdot H_{i,w}$$

$$\overline{\beta}_i = \frac{J_{d,i,w}}{A_{c,0} \cdot \left(c_{i,w} - c_{i,e}\right)},\quad i = \overline{1,N}$$

$$\overline{\beta}_j = \frac{J_{d,j,w}}{A_{c,0} \cdot \left(c_{j,w} - c_{j,e}\right)},\quad j = \overline{1,3}\,(O,N,C).$$

3. Результаты исследований. На рис. 2-4 сопоставлены характеристики уноса массы графита и параметров тепло- и массообмена, полученные численным решением уравнений пограничного слоя и в результате использования аналогии между этими процессами $\left(\overline{\beta}_j = \overline{A}_c, \quad j = \overline{1,3}\right)$.

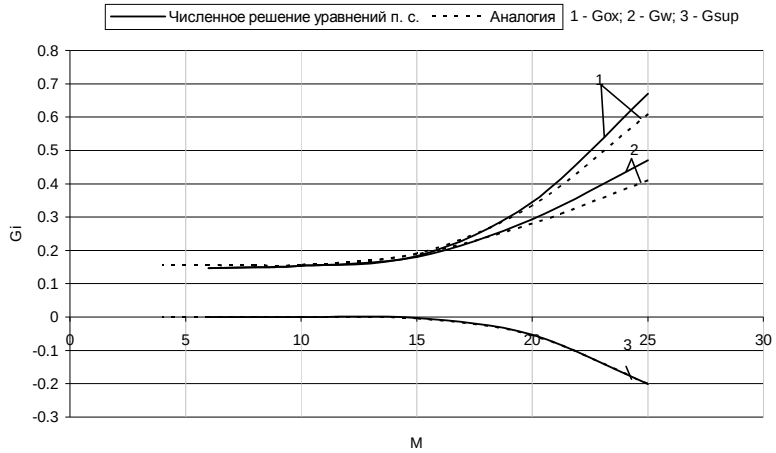


Рис. 2. Массовая скорость уноса массы материала

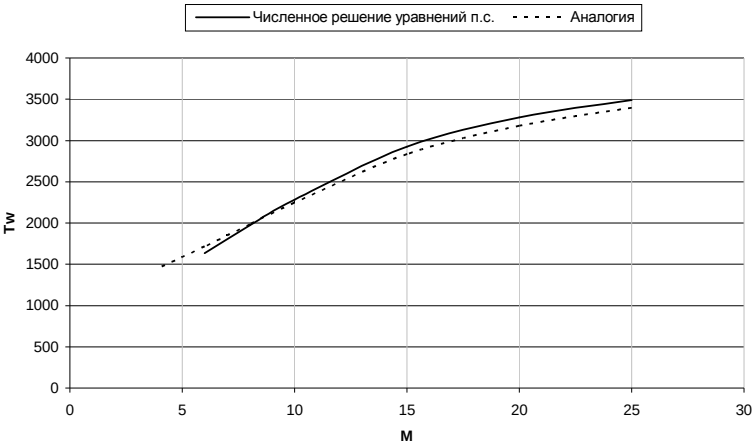
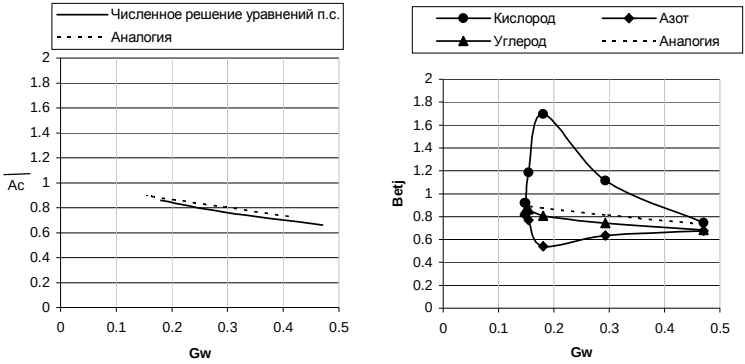


Рис. 3. Температура «стенки»



а. б.

Рис. 4. Зависимость безразмерных коэффициентов теплообмена (а) и массообмена химических элементов (б) от массовой скорости вдува паров материала в пограничный слой.

Из представленных данных следует, что использование инженерных методов решения рассматриваемой задачи, основанных на применении аналогии между процессами тепло – и массообмена, характеризуются приемлемой с точки зрения практических приложений точностью (погрешность расчета скорости разрушения материала не превышает 15 %), несмотря на значительное отличие в коэффициентах массообмена.

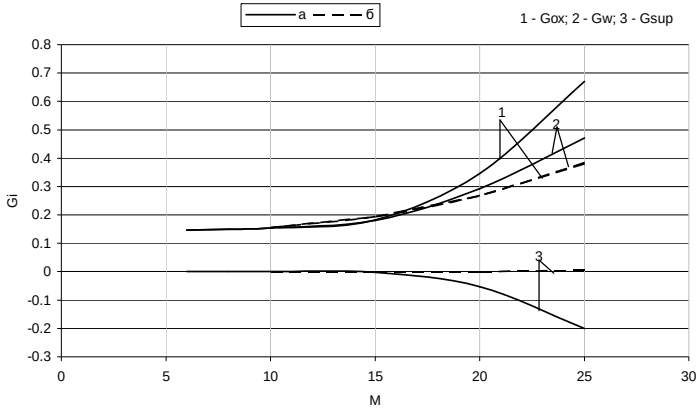


Рис. 5. Массовая скорость уноса массы материала.

На рис. 5-6 приводятся результат сопоставления параметров уноса массы материала, полученные с учетом (а) и без учета (б) участия продуктов сублимации углерода в химических реакциях на стенке.

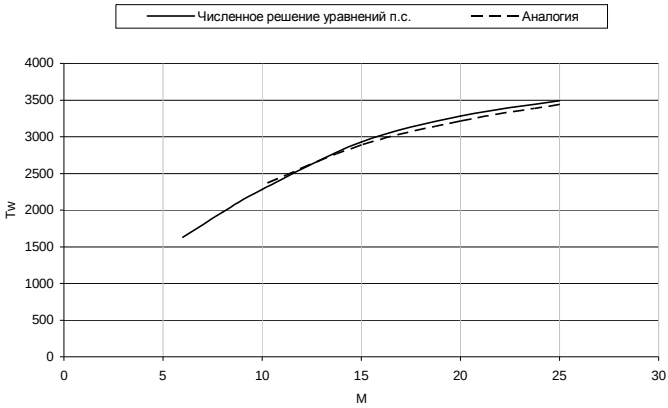


Рис. 6. Температура «стенки».

4. Выводы. Как следует из анализа представленных данных, учет полной термохимической модели уноса массы графита сопровождается кардинальным изменением физической картины протекания процесса. С ростом числа Маха наблюдается переход от диффузионного режима окисления углерода не к режиму испарения (рис. 1), а к кинетическому режиму окисления, обусловленному диссоциацией окиси углерода, что, в свою очередь, приводит к росту парциального давления углерода и, вследствие этого, к конденсации его на стенке.

Пренебрежение участием чисто углеродных соединений в химических реакциях на стенке может привести к ошибкам в скорости разрушения материала, достигающим 30 %, что далеко не всегда оказывается приемлемым.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анфимов Н. А. Горение графита в потоке воздуха при высоких температурах – Известия АН СССР. Механика и машиностроение, 1964. № 5. С. 3.
2. Горский В.В., Полежаев Ю.В. Теория горения – М: УНПЦ «Энергомаш», 2006. С. 303-323.
3. Scala S.M., Gilbert L.M. Sublimation of graphite at hypersonic speeds – AIAA journal, 1965. № 9. P. 87-100

УДК 536

А.Н. Лаврентьева, В.В. Горский

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ УНОСА МАССЫ СТЕКЛОПЛАСТИКА НА ОСЕСИММЕТРИЧНОМ ЗАТУПЛЕННОМ ТЕЛЕ, ОБТЕКАЕМОМ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ГАЗОВЫМ ПОТОКОМ

Рассматривается комплекс вопросов, связанных с расчетом параметров уноса массы стеклопластиков на затупленном теле вращения. В опубликованных работах рассмотрение указанной задачи ограничивается однородным кварцевым стеклом. А особенности, вносимые в механизм уноса массы материала продуктами деструкции связующего, проанализированы только для окрестности критической точки тела.

1. Введение. Рассмотрим квазистационарное аэротермохимическое разрушение модельного композиционного теплозащитного покрытия, представляющего собой изотропную механическую смесь двуокиси кремния и органической связки, в набегающем на него высокотемпературном газовом потоке в общем случае сложного химического состава.

При математическом моделировании процессов тепло- и массообмена, сопутствующих уносу массы материалов, учитывается возможность протекания всех основных физико-химических превращений: деструкции связки, гетерогенного химического взаимодействия между двуокисью кремния и углеродом во внутренних слоях материала, оплавления и неравновесного испарения двуокиси кремния, гетерогенного окисления углерода на внешней поверхности материала (на стенке), вторичной деструкции коксовых газов.

К числу основных видов экспериментальной отработки тепловой защиты относятся испытания ее в условиях летного эксперимента и в струях жидкостных ракетных двигателей, в процессе которых наблюдается значительное изменение исходной формы испытываемого тела. Для анализа результатов такой отработки, а также для проведения прикладных расчетов в условиях натурной эксплуатации изделий ракетно-космической техники, необходимы эффективные методы решения неавтомодельной задачи уноса массы стеклопластиков.

Расчет распределения динамических характеристик расплава и его температуры в рассматриваемой области пространства связан с необходимостью сопряженного решения уравнений сохранения массы, количества движения и энергии, записанных в частных производных.

Даже в случае оплавления однородного кварцевого стекла численное решение этих уравнений вызывает определенные проблемы. В сочетании с проведенными в работе [1] оценками погрешности, вносимой в расчеты оплавления двуокиси кремния использованием приближенного подхода, основанного на применении метода «локальной автомодельности», указанное обстоятельство послужило основой повсеместного применения именно этого метода при решении задач рассматриваемого класса (см., например, работы [2, 3]).

Использование численных методов расчета для определения скоростей оплавления двуокиси кремния и гетерогенного химического взаимодействия ее с углеродом также встречает значительные трудности при решении задач рассматриваемого класса. Поэтому для расчета протекания этих процессов будем использовать интегральные методы, основы которых заложены в работе [4].

2. Уравнения уноса массы. Как и принято повсеместно в литературе, процесс уноса массы двуокиси кремния в жидкой фазе описывается уравнениями ламинарного пограничного слоя, в которых инерционными силами пренебрегается по сравнению с силами вязкости:

$$\frac{\partial G_{SiO_2,L}}{\partial y} = \frac{\rho_{SiO_2}\xi_{SiO_2}}{r}\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{r}{\mu_{SiO_2}}\left(\tau_W + y\frac{dp_e}{dx}\right)\right]. \qquad (1)$$

Здесь приняты следующие обозначения: $0xy$ – криволинейная система координат, в которой ось $0x$ направлена вдоль образующей поверхности тела от его критической точки, а ось $0y$ – в направлении внешней нормали к этой поверхности. r – расстояние от поверхности тела до его оси симметрии. $G_{SiO_2,L}, \rho_{SiO_2}, \mu_{SiO_2}, \xi_{SiO_2}$ – локальная скорость уноса массы в жидкой фазе, плотность, коэффициент динамической вязкости и объемная концентрация двуокиси кремния. τ_W – поверхностное трение; p_e – давление на внешней границе газового пограничного слоя.

Для окрестности «критической точки», где, как известно,

$$r \approx x, \frac{dp_e}{dx} \approx \frac{d^2 p_e}{dx^2}\cdot x, \tau_W \approx \frac{d\tau_W}{dx}\cdot x, \mu_{SiO_2} = \mu_{SiO_2}(y),$$

уравнение (1) преобразуется к виду:

$$\frac{dG_{SiO_2,L}}{dy} = 2\frac{\rho_{SiO_2}\xi_{SiO_2}}{\mu_{SiO_2}}\left(\frac{d\tau_W}{dx} + y\frac{d^2 p_e}{dx^2}\right). \qquad (2)$$

Если проинтегрировать уравнение (1) в пределах $(-\infty, y]$, то уравнения для расчета локальной и суммарной скорости уноса массы двуокиси кремния в жидкой фазе записываются в форме:

$$G_{L,SiO_2}(y) = \frac{\rho_{SiO_2}\xi_{SiO_2}}{r}\frac{\partial}{\partial x}\left[r\tau_W \int_{-\infty}^{y} \frac{dy'}{\mu_{SiO_2}(x,y')} - \right.$$
$$\left. - r\frac{dp_e}{dx}\int_{-\infty}^{y}\frac{y'dy'}{\mu_{SiO_2}(x,y')}\right], \qquad (3)$$

$$G_{L,SiO_2,\Sigma} = \frac{\rho_{SiO_2}\xi_{SiO_2}}{r}\frac{\partial}{\partial x}\left[r\tau_W \int_{-\infty}^{0}\int_{-\infty}^{y'} \frac{dy''}{\mu_{SiO_2}(x,y'')} - \right.$$
$$\left. - r\frac{dp_e}{dx}\int_{-\infty}^{0}\int_{-\infty}^{y'}\frac{y''dy''}{\mu_{SiO_2}(x,y'')}\right]. \qquad (4)$$

Как видно, данная составляющая суммарной скорости уноса массы двуокиси кремния однозначно определяется зависимостью вязкости ее расплава от координат x и y, а точнее зависимостью от этих координат температуры расплава, которая описывается уравнением сохранения энергии вида:

$$\sum_k \left(c_{p,k} G_k \frac{\partial T}{\partial y}\right) + c_{p,SiO_2}\rho_{SiO_2}\xi_{SiO_2}u_{SiO_2}\frac{\partial T}{\partial x} =$$
$$= \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_{eff}\frac{\partial T}{\partial y}\right) - \omega_{\text{int}\,o}\Delta Q_{\text{int}\,o} \qquad (5)$$

Здесь: $c_{p,k}, G_k, u_k$ – удельная изобарная (для газовой фазы) теплоемкость, проекции векторов массовой скорости на ось y и линейной скорости на ось x k –ой компоненты материала. T – температура, λ_{eff} – эффективный коэффициент теплопроводности; $\omega_{\text{int}\,o}, \Delta Q_{\text{int}\,o}$ – скорость убыли массы конденсированного углерода во внутренних слоях материала за счет его гетерогенного химического взаимодействия с двуокисью кремния и тепловой эффект этой реакции.

Нелинейность этого уравнения обусловлена зависимостью от температуры теплофизических свойств материала, а также массовых расходов G_{SiO_2} и G_C. Наибольший практический интерес вызывают режимы уноса массы теплозащиты, характеризующиеся значительны-

ми скоростями термохимического разрушения. В этих условиях на второй план отодвигаются вопросы, связанные с нестационарностью процессов. А процессы оплавления двуокиси кремния и гетерогенного химического взаимодействия ее с углеродом протекают в тонком слое, примыкающем к «стенке».

3. Упрощенный подход. Как уже отмечалось выше, в рамках метода «локальной автомодельности» в уравнении сохранения количества энергии пренебрегается производной температуры по координате *x*, вследствие чего оно превращается в обыкновенное дифференциальное уравнение

$$\sum_k c_{p,k} G_k \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial y}\right) - \omega_{\text{int}\,o} \Delta Q_{\text{int}\,o} . \qquad (6)$$

Если далее закон затухания температуры в тонком слое записать в экспоненциальной форме

$$T(y) = T_W \cdot \exp(y / \delta_H), \qquad (7)$$

то «тепловая толщина» δ_H, являющаяся функцией координаты x, однозначно определяется удельным тепловым потоком $Q_W(-0)$, проникающим в материал через «стенку»:

$$\delta_H = \frac{\lambda_{m,eff}(T_W) T_W}{Q_W(-0)} .$$

В свою очередь, пренебрежение переменностью расходов массы отдельных компонент и вынос на «стенку» суммарного теплового эффекта гетерогенного химического взаимодействия между двуокисью кремния и углеродом во внутренних слоях материала, позволяет записать интеграл уравнения, взятый в пределах $(-\infty, 0]$, в виде:

$$Q_W(-0) = G_{\Sigma,-\infty} \cdot \left[c_{m,\int,\Sigma} (T_W - T_{-\infty}) + \varphi_r \Delta Q_r \right];$$

$$c_{m,\int,\Sigma} = \frac{\int_{T_{-\infty}}^{T_f} c_m(T)\,dT + \sum_k \pi_{k,f} \int_{T_f}^{T_W} c_{p,k}(T)\,dT}{T_W - T_{-\infty}} .$$

Здесь: $c_{m,\int,\Sigma}$ – суммарная среднеинтегральная удельная теплоемкость материала на интервале температур $[T_{-\infty}, T_W]$; c_m – удельная теплоемкость исходного материала.

Если, следуя работе [4], заменить для расплава двуокиси кремния экспоненциальный характер зависимости вязкости от температуры

$$\frac{\mu_{SiO_2}(T)}{\mu_{SiO_2,W}} = \exp\left(\frac{\alpha_{\mu,SiO_2}}{T} - \frac{\alpha_{\mu,SiO_2}}{T_W}\right) \tag{8}$$

на степенной

$$\frac{\mu_{SiO_2}(T)}{\mu_{SiO_2,W}} = \left(\frac{T_W}{T}\right)^{n_L}, \tag{9}$$

то подстановка экспоненциального профиля температур (7) в (9) позволяет получить искомую зависимость вязкости расплава двуокиси кремния от координаты y в форме:

$$\frac{\mu_{SiO_2}(y)}{\mu_{SiO_2,W}} = \exp\left(-\frac{y}{\delta_L}\right), \qquad \delta_L = \frac{\delta_H}{n_L}. \tag{10}$$

Здесь: $\mu_{SiO_2,W}$ – вязкость расплава двуокиси кремния, соответствующая температуре T_W, а δ_L – параметр, характеризующий скорость возрастания вязкости расплава по мере удаления от «стенки» (в литературных источниках его называют «толщины жидкой пленки»).

Определение показателя степени n_L обычно производится из условия равенства производных по температуре в зависимостях (8) и (9) на «стенке», т.е. при значении температуры, равном T_W:

$$n_L = \frac{\alpha_{\mu,SiO_2}}{T_W}. \tag{11}$$

Естественно, что использование условия равенства производных двух различных зависимостей для расчета вязкости расплава приводит к возникновению погрешностей счета одного знака. И, в этой связи, определенный интерес вызывает предложенный в работе [3] подход к уменьшению этой погрешности, основанный на замене формулы (7) соотношением вида:

$$\delta_H = \frac{\lambda_{m,eff}(T_W)\left(T_W - T_{-\infty}\right)}{Q_W(-0)}.$$

Как показано в этой работе, использование данной формулы в сочетании с (8) позволяет заметно снизить погрешность расчета скорости разрушения однородного кварцевого стекла, которая, однако, и без введения этой поправки не превышает нескольких процентов.

Подстановка (10) для расчета вязкости расплава двуокиси кремния в (3) и (4), приводит к следующим выражениям для скоростей уноса массы двуокиси кремния в жидкой фазе:

$$G_{L,SiO_2}(y)=\frac{\rho_{SiO_2}\xi_{SiO_2}}{r}\frac{d}{dx}\left\{\frac{r\delta_L}{\mu_{SiO_2,W}}\left[\tau_W+\frac{dp_e}{dx}(y-\delta_D)\right]\exp\left(\frac{y}{\delta_L}\right)\right\} \quad (12)$$

$$G_{L,SiO_2,\Sigma}=\frac{\rho_{SiO_2}\xi_{SiO_2}}{r}\frac{d}{dx}\left[\frac{r\delta_L^2}{\mu_{SiO_2,W}}\left(\tau_W-2\delta_L\frac{dp_e}{dx}\right)\right]. \quad (13)$$

В окрестности «критической» точки, где $r(x)\approx x$, $\delta_L(x)\approx$

$\approx\delta_L(0)$, $\tau_W(x)=x\frac{d\tau_W}{dx}(0)$, $\frac{dp_e}{dx}(x)=x\frac{d^2p_e}{dx^2}(0)$, $\mu_{SiO_2,W}(x)=$

$=\mu_{SiO_2,W}$, формулы (12) и (13) принимают вид:

$$G_{L,SiO_2}(y)=\frac{2\rho_{SiO_2}\xi_{SiO_2}\delta_L}{\mu_{SiO_2,W}}\left[\frac{d\tau_W}{dx}(0)+(y-\delta_L)\frac{d^2p_e}{dx^2}(0)\right]\cdot\exp\left(\frac{y}{\delta_L}\right);$$

$$G_{L,SiO_2,\Sigma}=\frac{2\rho_{SiO_2}\xi_{SiO_2}\delta_L^2}{\mu_{SiO_2,W}}\left[\frac{d\tau_W}{dx}(0)-2\delta_L\frac{d^2p_e}{dx^2}(0)\right].$$

Аналогичные приближенные соотношения могут быть получены и для расчета скорости уноса массы двуокиси кремния, обусловленного ее гетерогенным химическим взаимодействием с углеродом во внутренних слоях покрытия:

$$G_{into,SiO_2}(y)=\omega_{into}(y)\frac{M_{SiO_2}}{M_C}=$$

$$=\rho_{\Sigma,-\infty}\pi_{C,f}\left[W_1\omega_{1,W}\exp\left(\frac{y}{\delta_{R,1}}\right)\frac{M_{SiO_2}}{M_C}+\right.$$

$$\left.+(1-W_1)\omega_{2,W}\exp\left(\frac{y}{\delta_{R,2}}\right)\frac{\pi_{SiO_2,f}}{\pi_{C,f}}\right];$$

$$G_{into,SiO_2,\Sigma}=\int_{-\infty}^{0}G_{SiO_2,into}(y)\,dy=$$

$$=\rho_{\Sigma,-\infty}\pi_{C,f}\cdot\left[W_1\omega_{1,W}\delta_{R,1}\frac{M_{SiO_2}}{M_C}+(1-W_1)\omega_{2,W}\delta_{R,2}\frac{\pi_{SiO_2,f}}{\pi_{C,f}}\right].$$

Здесь функция $\omega(y)$ представлена в виде суммы двух кинетических зависимостей, взятых с весовыми коэффициентами W и 1–W, а $\pi_{k,f}$ – – массовая концентрация k-ой компоненты в материале после завершения процесса деструкции связки.

4. Расчетная модель. Примем далее: 1) Химический состав газа в пограничном слое ограничивается набором компонент

$$SiO_2, SiO, CO_2, CO, H_2O, H_2, OH, H, NO, N_2, O_2, O, Si, C_2H_2, Nr\ , \quad (14)$$

2) Для его расчета на «стенке» используется система алгебраических уравнений, включающая в себя балансы масс химических элементов и уравнения равновесия химических реакций. 3) Скорость сублимации двуокиси кремния описывается формулой Ленгмюра-Кнудсена [5]. 4) Компонентой материала, определяющей его скорость аэротермохимического разрушения в целом, является двуокись кремния. 5) Коэффициент газификации конденсированного углерода на «стенке» является заданной величиной.

Тогда система уравнений, определяющая характеристики уноса массы в фиксированной точке на поверхности тела, имеет вид:

$$G_{sub,SiO_2} = c_{a,SiO_2} s_{y,W,SiO_2} \frac{p^*_{SiO_2,W} - p_{SiO_2,W}}{\sqrt{2\pi R_0 T_W / M_{SiO_2}}}; \quad (15)$$

$$G_{\Sigma,-\infty} = \left(G_{sub,SiO_2} + G_{L,SiO_2,\Sigma} + G_{\mathrm{int}o,SiO_2,\Sigma}\right) / \pi_{SiO_2,f};$$

$$G_{L,SiO_2,\Sigma} = \frac{\rho_{SiO_2}\xi_{SiO_2}}{r}\frac{d}{dx}\left[\frac{r\delta_L^2}{\mu_{SiO_2,W}}\left(\tau_W - 2\delta_L\frac{dp_e}{dx}\right)\right]; \quad (16)$$

$$G_{\mathrm{int}o,SiO_2,\Sigma} = \int_{-\infty}^{0} G_{SiO_2,\mathrm{int}o}(y)\cdot dy =$$

$$= \rho_{\Sigma,-\infty}\pi_{C,f}\cdot\left[W_1\omega_{1,W}\delta_{R,1}\frac{M_{SiO_2}}{M_C} + (1-W_1)\omega_{2,W}\delta_{R,2}\frac{\pi_{SiO_2,f}}{\pi_{C,f}}\right]; \quad (17)$$

$$
\begin{cases}
p^*_{SiO_2} = \exp\left(\beta^*_{SiO_2} - \dfrac{\alpha^*_{SiO_2}}{T_W}\right); \quad \mu_{SiO_2,W} = \exp\left(\dfrac{\alpha_{\mu,SiO_2}}{T_W} - \beta_{\mu,SiO_2}\right); \\
\delta_H = \dfrac{\lambda_{m,eff}\left(T_W\right)}{Q_W\left(-0\right)}; \quad \delta_L = \dfrac{\delta_H}{n_L}; \quad \delta_{R,i} = \dfrac{\delta_H}{n_{R,i}}; \\
n_L = \dfrac{\alpha_\mu}{T_W}; \; n_{R,i} = \dfrac{\alpha_i}{T_W}, \quad i = 1,2; \\
\left(A_h + G_{\Sigma,W+0}\right)\sum_i^{14} l_{j,i} Z_{i,W} = \left(A_h C^+_{j,e} + G^+_{j,W+0}\right) / M_j, \; j = \overline{1,5} \\
Q_W\left(-0\right) = A_h\left(h_{00} - h_{\Sigma,W}\right) + \sum_k G_{k,W}\left(+0\right) h_{k,W} - G_{\Sigma,W+0} h_{\Sigma,W} - \\
-\varepsilon_W \sigma T_W^4 - G_{\text{int}\,o,SiO_2,\Sigma} \Delta Q_{\text{int}\,o} M_C / M_{SiO_2} - G_{\Sigma,-\infty} \varphi_r \Delta Q_{r,W}; \\
G^+_{j,W+0} = \sum_k G_{k,W+0} \nu_{j,k}; \\
Z_{i,W} = \dfrac{C_{i,W}}{M_i}, i = \overline{1,14}; \sum_{i=1}^{15} C_{i,W} = 1; M_{\Sigma,W} = 1 / \sum_{i=1}^{15} Z_{i,W}; C^+_{j,e} = \\
= \sum_{i=1}^{15} C_{i,e} \nu_{j,i}, \\
Z_2 \cdot \sqrt{Z_{11}} / Z_1 = k_{eq,SiO_2} / \left(k_{eq,SiO} \sqrt{p_e M_{\Sigma,W} k_{eq,O_2}}\right); \\
Z_4 \cdot \sqrt{Z_{11}} / Z_3 = k_{eq,CO_2} / \left(k_{eq,CO} \sqrt{p_e M_{\Sigma,W} k_{eq,O_2}}\right); \\
Z_6 \cdot \sqrt{Z_{11}} / Z_5 = k_{eq,H_2O} / \left(k_{eq,H_2} \sqrt{p_e M_{\Sigma,W} k_{eq,O_2}}\right); \\
Z_7 / \sqrt{Z_6 \cdot Z_{11}} = \sqrt{k_{eq,O_2} k_{eq,H_2}} / k_{eq,OH}; \\
Z_9 / \sqrt{Z_{10} \cdot Z_{11}} = \sqrt{k_{eq,O_2} k_{eq,N_2}} / k_{eq,NH}; \\
Z_8^2 / Z_6 = k_{eq,H_2} / \left(p_e M_{\Sigma,W}\right); \; Z_{12}^2 / Z_{11} = k_{eq,O_2} / \left(p_e M_{\Sigma,W}\right); \\
Z_{13} \sqrt{Z_{11}} / Z_2 = k_{eq,SiO} / \sqrt{p_e M_{\Sigma,W} k_{eq,O_2}}; \\
Z_{14} \cdot Z_{11} / \left(Z_4^2 Z_6\right) = p_e M_{\Sigma,W} k_{eq,H_2} k^2_{eq,CO} / \left(k_{eq,O_2} k_{eq,C_2H_2}\right);
\end{cases}
\tag{18}
$$

$$G_{\Sigma,W+0} = G^{(s)}_{SiO_2,W+0} + G^{(s)}_{C,W+0} + G^{(g)}_{CO,W+0} + G^{(g)}_{SiO,W+0} + G^{(g)}_{H_2,W+0} +$$

$$+G^{(g)}_{N_2,W+0};$$

$$G^{(s)}_{C,W+0} = \left(G_{\Sigma,-\infty}\pi^{(s)}_{C,f} - G_{\mathrm{int}o,SiO2,\Sigma}\frac{M_C}{M_{SiO_2}} \right)\gamma_{C,W,f} + G_{\Sigma,-\infty}\gamma_{C,W,W};$$

$$G^{(s)}_{SiO_2,W+0} = G_{sub,SiO_2};\ \ G^{(g)}_{SiO,W+0} = G_{\mathrm{int}o,SiO_2,\Sigma}\gamma_{g,W}\frac{M_{SiO}}{M_{SiO_2}}$$

$$G^{(g)}_{CO,W+0} = \left[G_{\Sigma,-\infty}\left(\pi^{(g)}_{CO,f} + \pi^{(g)}_{CO,W}\right) + G_{\mathrm{int}o,SiO_2,\Sigma}\frac{M_{CO}}{M_{SiO_2}} \right]\gamma_{g,W};$$

$$G^{(g)}_{k,W+0} = G_{\Sigma,-\infty}\cdot\left(\pi^{(g)}_{k,f} + \pi^{(g)}_{k,W}\right)\cdot\gamma_{g,W};\ k = H_2, N_2$$

Здесь: $l_{j,i}$ – число атомов в i-ом веществе, цифровая нумерация компонент газовой смеси соответствует порядку их расположения в списке (14), Nr – нейтральное вещество, не принимающее участие в химических реакциях.

5. Построение численного решения данной системы уравнений сопряжено с необходимостью преодоления двух основных проблем. Первая из них обусловлена наличием производной по координате x. При этом функция, стоящая под знаком производной, зависит от координаты x как непосредственно, так и через температуру «стенки» и суммарную массовую скорость разрушения материала. Поэтому, в соответствии с правилом дифференцирования сложной функции

$$\frac{df\left(x,T_W,G_{\Sigma,-\infty}\right)}{dx} = \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial T_W}\frac{dT_W}{dx} + \frac{\partial f}{\partial G_{\Sigma,-\infty}}\frac{dG_{\Sigma,-\infty}}{dx},$$

где $f = \dfrac{r\delta_L^2}{\mu_{SiO_2,W}}\left(\tau_W - 2\delta_L\dfrac{dp_e}{dx}\right)$, уравнение (16) преобразуется к виду:

$$\frac{\partial f}{\partial T_W}\frac{dT_W}{dx} + \frac{\partial f}{\partial G_{\Sigma,-\infty}}\frac{dG_{\Sigma,-\infty}}{dx} =$$

$$= \left(G_{\Sigma,-\infty}\pi^{(s)}_{SiO_2,f} - G_{sub,SiO_2} - G_{\mathrm{int}o,Sio_2,\Sigma}\right)\frac{r}{\rho_{SiO_2}\xi_{SiO_2}} - \frac{\partial f}{\partial x} \qquad (19)$$

Дифференцируя далее по координате x уравнение (5), получаем второе уравнение, связывающее между собой производные температу-

ры «стенки» и суммарной скорости разрушения материала:

$$\left\{G_{\Sigma,-\infty}\cdot\left[\frac{\partial c_{m,\int,\Sigma}}{\partial T_W}\cdot\left(T_W-T_{-\infty}\right)+c_{m,\int,\Sigma}\right]-\frac{\partial Q_W\left(-0\right)}{\partial T_W}\right\}\frac{dT_W}{dx}+$$

$$+\left[c_{m,\int,\Sigma}\left(T_W-T_{-\infty}\right)+\varphi_r\Delta Q_r+G_{\Sigma,-\infty}\frac{\partial c_{m,\int,\Sigma}}{\partial G_{\Sigma,-\infty}}\cdot\left(T_W-T_{-\infty}\right)-\right. \qquad (20)$$

$$\left.-\frac{\partial Q_W\left(-0\right)}{\partial G_{\Sigma,-\infty}}\right]\frac{dG_{\Sigma,-\infty}}{dx}=\frac{\partial Q_W\left(-0\right)}{\partial x}$$

Рассматривая далее уравнения (19) и (20) как систему линейных алгебраических уравнений относительно dT_W/dx и $dG_{\Sigma,-\infty}/dx$, получаем систему обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка по координате x, разрешенную относительно производных.
В окрестности “критической” точки

$$f\approx\frac{x^2\delta_L^2}{\mu_{SiO_2,W}}\left[\frac{d\tau_W}{dx}(0)-2\delta_L\frac{d2p_e}{dx^2}(0)\right]$$

и уравнение (52) становится алгебраическим:

$$\frac{G_{\Sigma,-\infty}\pi^{(s)}_{SiO_2,f}-G_{sub,SiO_2}-G_{\mathrm{int}o,Si0_2,\Sigma}}{\rho_{SiO_2}\xi_{SiO_2}}=\frac{2\delta_L^2}{\mu_{SiO_2,W}}\left[\frac{d\tau_W}{dx}(0)-2\delta_L\frac{d^2p_e}{dx^2}(0)\right]$$

Значения T_W^0 и $G_{\Sigma,-\infty}^0$ температуры «стенки» и суммарной скорости уноса массы материалы, найденные с использованием этого уравнения, являются граничными условиями для (19), (20):

$$T_W\left(0\right)=T_W^0,G_{\Sigma,-\infty}\left(0\right)=G_{\Sigma,-\infty}^0.$$

Таким образом, данная задача является задачей Коши, записанной в каноническом виде, вследствие чего для ее решения могут быть использованы классические численные методы типа метода Рунге-Кутта [6], совмещенные с системой автоматического выбора шага интегрирования из условия обеспечения заданной точности [7]. Входящие в уравнения (19), (20) частные производные искомых функций определяются из решения соответствующих систем алгебраических уравнений, составленных на базе дифференцирования уравнений (15), (18). Описанный подход к решению данной задачи может рассматриваться как развитие метода работы [3], посвященной оплавлению однородного кварцевого стекла.

Вторая из указанных выше проблем связана со сложностью процедуры расчета химического состава газовой смеси на «стенке» в ус-

ловиях в общем случае неоднозначной зависимости скорости разрушения материала в целом от температуры «стенки». Анализ основных закономерностей протекания уноса массы стеклопластиков, показал, что химический состав газовой смеси на «стенке» тесно связан со степенью неравновесности процесса сублимации двуокиси кремния Υ_{SiO_2}, под которой понимается отношение парциального давления этой компоненты к давлению насыщенного пара:

$$\Upsilon_{SiO_2,W} = p_{SiO_2,W} / p^*_{SiO_2,W} .$$

Базируясь на результатах указанного термодинамического анализа, химический состав газовой смеси на «стенке» с достаточной степенью строгости может быть ограничен первыми 12-ью компонентами из набора (14) и нейтральной компонентой в следующих двух случаях: 1) на режиме равновесной сублимации двуокиси кремния, когда $\Upsilon_{SiO_2,W} \approx 1$; 2) на частично неравновесном режиме этого процесса, когда парциальное давление двуокиси кремния на «стенке» не столь уж велико, но пренебречь его наличием не представляется возможным.

В то же самое время на режиме чисто неравновесной сублимации двуокиси кремния, т.е. при выполнении условия $\Upsilon_{SiO_2,W} << 1$, строгий расчет химического состава газовой смеси на «стенке» сопряжен с необходимостью учета до 50-ти различных химических соединений. Возникновение этого режима оказывается возможным только в том случае, когда минимальные потребности углерода в окислении (с образование CO) не могут быть удовлетворены за счет полной однократной диссоциации двуокиси кремния, т.е. при нарушении условия вида: $\Delta^+_{C,W} = Z^+_{C,W} + Z^+_{Si,W} - Z^+_{O,W} < 0$,

где $Z^+_{j,W} = \left(A_h C^+_{j,e} + G^+_{j,W+0} \right) / M_j$.

При этом максимальный и минимальный суммарный тепловой эффект физико-химических превращений, протекающих на «стенке», реализуются в том случае, когда переход в газовую фазу избытка углерода $\Delta^+_{C,W}$ полностью обеспечивается за счет прохождения соответственно химических реакций вида:

$$C^{(S)} + SiO^{(g)} \leftrightarrow CO^{(g)} + Si^{(g)}, \qquad 2C^{(s)} + H_2^{(g)} \leftrightarrow C_2H_2^{(g)} .$$

При решении практических задач учитываем следующие условия. 1). Режим чисто неравновесной сублимации двуокиси кремния возникает достаточно редко. 2). Различие в суммарных тепловых эффектах физико-химических процессов, протекающих на «стенке»,

крайне незначительно сказывается на обгаре тепловой защиты. 3). В рамках рассматриваемой методики на данном режиме подробный расчет химического состава газовой смеси на «стенке» заменяется построением предельных оценок, соответствующих наборам компонент SiO, CO, H_2, H, N_2, Si и $SiO, CO, H_2, N_2, C_2H_2$.

6. Результаты исследования. Изучались зависимости основных характеристик уноса массы (эффективной энтальпия материала H_{eff} и коэффициента поверхностной газификации двуокиси кремния Γ) для типичного стеклопластика на фенольной смоле от высоты движения тела. На рис. 1 и 2 представлены результаты расчета величины H_{eff} при фиксированном числе Маха $M = 25$. Видно, что с ростом высоты полета от 10 до 30 *км* наблюдается заметное уменьшение эффективной энтальпии и повышение коэффициента газификации.

Известно, что при больших скоростях полета (а здесь рассматривается именно такой случай) основной вклад в эффективную энтальпию материала дает эффект вдува паров материала в газовый пограничный слой и что эффективность этого фактора существенно уменьшается при переходе от ламинарного режима течения газа в пограничном слое к турбулентному режиму. Это и является причиной резкого уменьшения H_{eff}, отмеченного выше.

В то же время существенное увеличение интенсивности теплообмена, свойственное возникновению турбулентности, вызывает повышение температуры «стенки», что приводит к росту Γ. При больших высотах движения тела возникновения турбулентности не наблюдается, а однозначное уменьшение интенсивности тепловой нагрузки, имеющее место с ростом координаты r, обусловливают постепенное снижение как H_{eff}, так и Γ.

На рис. 3 и 4 приводятся аналогичные данные, иллюстрирующие роль окисления углерода в суммарном процессе уноса массы материала. Как видно из представленных данных, на малых высотах полёта учет окисления углерода приводит к резкому возрастанию H_{eff} и Γ при ламинарном режиме течения газа в пограничном слое. Это является следствием относительно небольшой интенсивности теплообмена, которая не может обеспечить достаточно большую величину Γ без участия в этом процессе окисления углерода, которое интенсифицирует процесс испарения двуокиси кремния. При турбулентном же режиме течении газа в пограничном слое интенсивность теплообмена столь велика, что Γ достигает единичного значения и без «помощи» окисления углерода.

На больших же высотах полёта на всей поверхности изделия реализуется ламинарный режим течения газа в пограничном слое, вследствие чего учет окисления углерода приводит к однозначному увеличению Γ. H_{eff} так же при этом увеличивается на большей части поверхности изделия. И лишь в той её части, где $A \approx 0$, учет окисления углерода приводит к уменьшению эффективной энтальпии за счет выделения тепла на стенке, сопутствующего прохождению этой химической реакции.

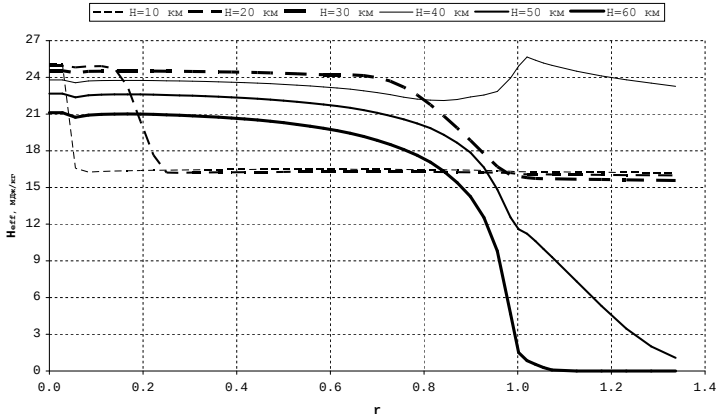


Рис. 1. Зависимость эффективной энтальпии H_{eff} от r на различных высотах полета при M=25.

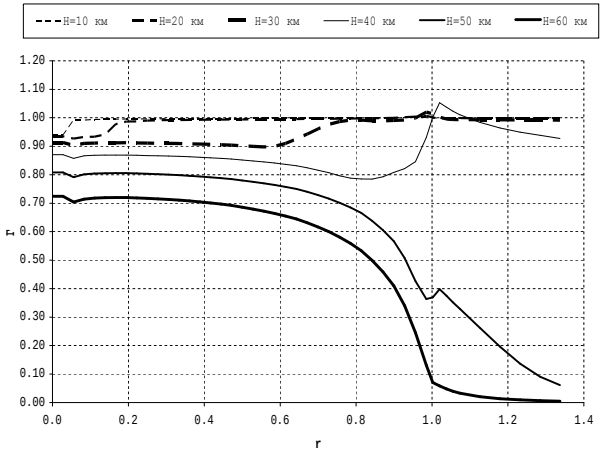


Рис.2. Зависимость коэффициента газификации Γ от r на различных высотах полета при M=25.

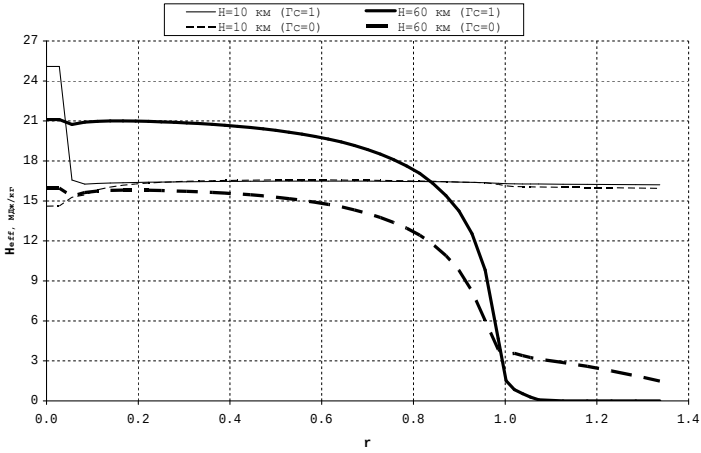


Рис.3. Зависимость эффективной энтальпии H_{eff} от r при различных коэффициентах газификации углерода

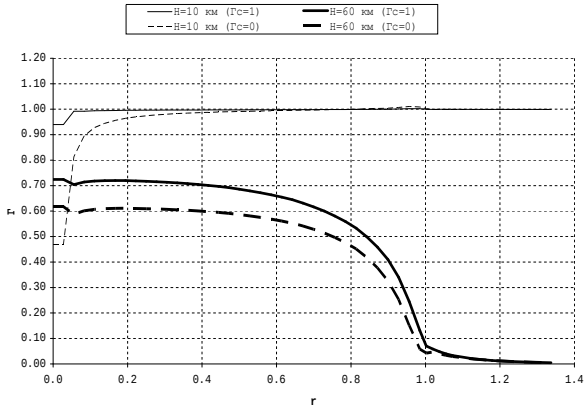


Рис.4. Зависимость коэффициента газификации Γ от r при различных коэффициентах газификации углерода

7. Заключение. Предложен эффективный численный метод решения задачи об уносе массы стеклопластика на затупленном теле вращения произвольного очертания, в рамках которого учитывается воз-

можность прохождения всех основных физико-химических превращений, сопутствующих протеканию рассматриваемого явления.

Проанализировано влияние, оказываемое окислением углерода на стенке на суммарные параметры уноса массы материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Adams E. //JASS. 1961. № 11. P.
2. Hidalgo H. Ablation of glassy materials around blunt bodies of revolution. ARS J. 1960. V. 30, № 9. Pp. 806 – 814.
3. Горский В.В., Полежаев Ю.В. О некоторых особенностях, связанных с течением пленки расплава. Теплофизика высоких температур. 1966. № 3.
4. Бете Х., Адамс К. Теория абляции стекловидных материалов. Вопросы ракетной техники. 1960. № 2. С. 63 – 79.
5. Полежаев Ю. В. Сублимация. – В кн. Физический энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия. 1966. Т.5. С. 101.
6. Березин И. С., Жидков Н. П. Методы вычислений. М.: Физматгиз. 1962. Т. 2. 639 с.
7. Кузнецова Т. П. Интегрирование систем обыкновенных дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутта: СП-0045. – В кн. Библиотека стандартных программ. М.: ВЦ АН СССР. 1961. С. 60-74.
8. Горский В. В., Полежаев Ю. В. Тепло – и массообмен на поверхности стеклографиттовых материалов в высокотемпературном газовом потоке //Механика жидкости и газа. 1972. № 6. С. 71-87.

УДК 536

Е.Г. Ватолина, Д.Н. Жулябин, А.А. Оленичева

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ ЛАМИНАРНОГО ВОЗДУШНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ В ОКРЕСТНОСТИ КРИТИЧЕСКОЙ ТОЧКИ

Приводятся данные по теплообмену в ламинарном воздушном пограничном слое в окрестности критической точки сферы, полученные с использованием различных подходов к расчету свойств газовой смеси.

1. Автомодельная задача стационарного течения газа в равновесном воздушном пограничном слое в окрестности критической точки сферы обтекаемой сверхзвуковым газовым потоком, описывается общепринятой системой уравнений вида [1]:

$$
\begin{cases}
\left(lf_{\eta\eta}\right)_{\eta} = -f\cdot f_{\eta\eta} + \dfrac{1}{2}\left(f_{\eta}^{\,2} - \dfrac{\rho_e}{\rho}\right), \\
\left(\dfrac{\lambda}{\mu} lT_{\eta}\right)_{\eta} = -c_p f T_{\eta} + T_{\eta}\psi_e \sum\limits_{i=1}^{N} c_{pi} J_i + \dfrac{1}{2\rho\beta_e}\sum\limits_{i=1}^{N} w_i H_i, \\
fc_{i\eta} = \psi_e J_{i\eta} + \dfrac{w_i}{2\rho\beta_e}, \quad i = \overline{1,N}, \\
\chi_{i\eta} = \dfrac{\psi_e \mu_e \rho_e M}{\rho^2}\sum\limits_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{N}\left(\dfrac{\chi_i J_j}{M_j D_{ij}} - \dfrac{\chi_j J_i}{M_i D_{ij}}\right), \quad i = \overline{1,N-1}, \\
\psi_e = \dfrac{1}{\sqrt{2\cdot\rho_e\cdot\mu_e\cdot\beta_e}}, \quad \rho = \dfrac{PM}{R_0 T}, \\
\rho u\dfrac{\partial c_j}{\partial x} + \rho v\dfrac{\partial c_j}{\partial y} = -\dfrac{\partial J_j}{\partial y}, \; j = O, N \\
\dfrac{\chi_O^2}{\chi_{O_2}} = \dfrac{K_{p,O_2}(T)}{P}, \quad \dfrac{\chi_N^2}{\chi_{N_2}} = \dfrac{K_{p,N_2}(T)}{P}, \quad \dfrac{\chi_N \chi_O}{\chi_{NO}} = \dfrac{K_{p,NO}(T)}{P}, \\
\sum\limits_{i=1}^{N} c_i = 1, \quad \sum\limits_{i=1}^{N} J_i = 1, \quad \sum\limits_{i=1}^{N} J_i = 1, \quad M = \dfrac{1}{\sum\limits_{i=1}^{N} c_i M_i}, \; \chi_i = c_i\dfrac{M}{M_i},
\end{cases}
\tag{1}
$$

При $\eta = 0$: $T = T_w$, $f = f_w$, $f_\eta = 0$,

$$\frac{\chi_{O,w}^2}{\chi_{O_2,w}} = \frac{K_{p,O_2}(T_w)}{P}, \quad \frac{\chi_{N,w}^2}{\chi_{N_2,w}} = \frac{K_{p,N_2}(T_w)}{P}, \quad \frac{\chi_{N,w}\chi_{O,w}}{\chi_{NO,w}} = \frac{K_{p,NO}(T_w)}{P},$$

$$J_{j,w} = \begin{cases} 0, \text{ если } G_w \le 0 \\ G_w\left(c_{j,e} - c_{j,w}\right), \text{ если } G_w > 0 \end{cases} \qquad j = O, N.$$

При $\eta = \eta_e$:

$$T = T_e, \quad f_\eta = 1, \quad \chi_i = \chi_{ie}, i = \overline{1,N}, \quad \chi_j = \sum_{i=1}^{N} \chi_i \nu_{ji}, \quad c_j = \sum_{i=1}^{N} c_i \nu_{ji}.$$

2. Обозначения: η – автомодельная координата Лиза-Дородницына, $l = \rho\mu/\rho_e\mu_e$ – параметр Чепмена-Рубезина, f – безразмерная функция тока, T – температура. P, ρ, μ, λ, c_p, M – давление, плотность, коэффициент динамической вязкости, коэффициент молекулярной теплопроводности, удельная изобарная теплоёмкость и суммарная молекулярная масса. H_i, P_i, c_i, χ_i, J_i, w_i, c_{pi} – энтальпия, парциальное давление, массовая концентрация, мольная концентрация, проекция диффузионного потока на ось y, массовая скорость образования компоненты за счет прохождения химических реакций и удельная изобарная теплоёмкость i-ой компоненты смеси. N – число компонент в исследуемой смеси газов; R_0 – универсальная газовая постоянная; D_{ij} – бинарный коэффициент диффузии; $K_{p,i}(T)$ – константа равновесия химических реакций образования i-ой компоненты из атомов; β_e – градиент скорости невязкого обтекания в окрестности критической точки.

Компоненты пронумерованы в следующем порядке: O, O_2, N, N_2, NO, Ar. Индексы: η – означает дифференцирование по данной переменной; w, e – относятся к параметрам на поверхности тела и на внешней границе пограничного слоя.

3. Расчетные схемы. Если рассматривается замороженный пограничный слой, то все $w_i = 0$ из общей системы исключаются уравнения для их определения.

Если расчет диффузии проводится в рамках закона Фика, то в системе (1) принимаем:

$$J_i = -2\rho^2 \beta_e \psi_e D_f c_{in}, \quad i = \overline{1, N},$$

где D_f – коэффициент бинарной диффузии Фика.

Переносные свойства смеси рассчитываются с использованием метода Гиршфельдера [2]. Параметры межмолекулярного взаимодействия рассчитывались на базе современных данных по вязкости отдельных компонент, опубликованных в работе [3].

В рамках расчетных схем совершенного газа или газа со свойствами равновесного воздуха в состоянии термохимического равновесия система уравнений (1) сводится к виду:

$$\left(\frac{1}{p_r} H_\eta\right)_\eta = -fH_\eta.$$

При этом для случая совершенного газа:

$$\frac{\mu}{\mu_\infty} = \left(\frac{H}{H_\infty}\right)^{0.7}, \quad \frac{\lambda}{\mu_\infty} = \left(\frac{H}{H_\infty}\right)^{0.85}, \quad c_p = \text{const}, \quad \gamma = \text{const}.$$

В рамках приближения, основанного на использовании свойств воздуха, находящегося в состоянии термохимического равновесия все свойства рассчитываются с использованием аппроксимационных зависимостей от H и P:

$$\mu = \mu(H, P), \quad \lambda = \lambda(H, P), \quad \rho = \rho(H, P), \quad c_p = c_p(H, P).$$

Расчеты проведены в диапазоне изменений чисел Маха $2 \le M \le 25$, давления P_e в пограничном слое $0.01 \le P_e \le 100\,атм$ и энтальпийного фактора H_f, соответствующего изменению температуры стенки в диапазоне от $300^o K$ до температуры, при которой давление насыщенных паров атомарного углерода равно давлению в пограничном слое. Результаты расчетов аппроксимировались функциональной зависимостью вида:

$$St = \varphi \cdot \mathrm{Re}^{\alpha_1} \cdot M^{\alpha_2} \cdot H_f^{\alpha_3}.$$

Параметры $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \varphi$ находятся методом наименьших квадратов [4].

4. Анализ полученных результатов показал, что коэффициент α_3 при H_f незначительно отличается от 0, а α_1 при Re незначительно отличается от -0.5, что согласуется с теорией: $St \sim \frac{1}{\sqrt{\mathrm{Re}}}$. Остальные параметры приведены в таблице 1.

Таблица 1.

№ метода	*Описание*	φ	α_2
1	Совершенный газ	0,91054	0,70971
2	Газ со свойствами воздуха в состоянии термохимического равновесия.	1,1645	0,69235
3	Замороженный воздушный пограничный слой с расчетом диффузии в рамках уравнений Стефана-Максвелла.	1,1228	0,69235
4	Равновесный воздушный пограничный слой с расчетом диффузии в рамках уравнений Стефана-Максвелла	1,1464	0,68263
5	Замороженный воздушный пограничный слой с расчетом диффузии в рамках закона Фика	1,1720	0,67236
6	Равновесный воздушный пограничный слой с расчетом диффузии в рамках закона Фика	1,2654	0,62780

Анализируя результаты, полученные по аппроксимационным формулам для шести различных подходов к вычислению свойств воздуха, изображённые на рисунке 1, можно сделать следующие выводы. Использование двух различных предельных подходов к расчету свойств газа, свойств совершенного газа и свойств воздуха в состоянии термохимического равновесия, дает дорожку неопределенности в параметрах теплопередачи порядка 20%, внутри которой размещаются соответствующие данные, полученные с учётом диффузии компонент газовой смеси. Расчёты, выполненные в рамках замороженного и равновесного пограничных слоёв, которые дают дорожку влияния неопределенности в скоростях прохождения химических реакций на интенсивность теплопередачи, существенно уменьшают полученную неопределенность до 10% в рамках закона Фика и до 1% в рамках уравнений Стефана-Максвелла.

Важным представляется тот факт, что переход от уравнений Стефана-Максвелла к упрощенному подходу для расчёта диффузии, а именно, закону Фика, даёт увеличение погрешности не более чем на 10%. Это является следствием того обстоятельства, что компоненты воздуха действительно могут быть разбиты на две группы (атомов и молекул) диффундирующих в одном направлении.

В рамках замороженного подхода к расчету химических реакций, протекающих в пограничном слое, результаты, полученные в рамках закона Фика практически идентичны аналогичным результатам, полученным при использовании уравнений Стефана-Максвелла. В

тоже время в рамках равновесного подхода использование закона Фика приводит к уменьшению интенсивности теплообмена примерно на 10%.

Полученные в работе результаты по влиянию предельных случаев прохождения химических реакций в пограничном слое находятся в удовлетворительном согласии с аналогичными данными, полученными по формулам Фея-Ридделла (и в том и в другом случае максимальная величина различия в параметрах теплопередачи не превышает 2 – 3%).

В таблице 2 приводятся оценки максимальных и среднеинтегральных погрешностей полученных аппроксимационных формул в сравнении с исходными результатами численного решения уравнений ламинарного воздушного пограничного слоя в окрестности критической точки сферы, послужившими основой для их получения, а также аналогичные данные, относящиеся к использованию известных литературных источников.

Таблица 2

метод	*Среднеинтегральная погрешность*	*Максимальная погрешность*
1	5	20
2	4	16
3	2,5	9,5
4	2,5	11,5
5	3,5	14
6	5	14
Работа [5]	6	12
Формулы Фея-Ридделла для замороженного п.с.	6	16
Формулы Фея-Ридделла для равновесного п.с.	5,5	19

Предложенные аппроксимационные формулы для решения уравнений замороженного воздушного пограничного слоя в окрестности критической точки сферы с расчетом диффузии в рамках уравнений Стефана-Максвелла, могут быть рекомендованы к использованию на практике, т.к. их среднеинтегральные погрешности существенно меньше, чем у аналогов.

5. Выводы. Получено численное решение уравнений ламинарного воздушного пограничного слоя в окрестности критической точки сферы для различных подходов к расчету свойств воздушной смеси. Рассматривались предельные оценки для скоростей протекания химических реакций в пограничном слое и предельные, с точки зрения точ-

ности, уравнения для расчета диффузии в пограничном слое. При этом использовались современные данные по переносным свойствам газовых смесей.

Предложены аппроксимирующие формулы для расчёта коэффициента теплообмена в рамках всех рассмотренных подходов и проведен анализ их точности.

Проведен сравнительный анализ точности предложенных аппроксимационных формул и аналогичных подходов по известным в литературе данным.

Показано, что при расчете диффузии в рамках уравнений Стефана-Максвелла, влияние скоростей протекания химических реакций на интенсивность теплопередачи практически исчезает (не превосходит 1%). Это позволяет исключить неопределенность в интенсивности теплопередачи, обусловленную скоростями протекания химических реакций.

Показано, что повышение качества расчета диффузии сопровождается уменьшением погрешности аппроксимационных формул для расчета интенсивности теплопередачи.

Показано, что предложенные аппроксимационные формулы характеризуются существенно меньшими погрешностями по сравнению с известными в литературе, вследствие чего они могут быть рекомендованы к использованию на практике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анфимов Н.А. Горение графита в потоке воздуха при высоких температурах. //Известия АН СССР. Механика и машиностроение. 1964. №5. С.3-11.
2. Гиршфельдер Дж., Кертис Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. М.: Издательство Иностранной литературы. 1961.- 929с.
3. Olynick D., Chen Y.K., Tauber M.E. Aerothermodynamics of the Stardust Sample Return Capsule.- Journal of Spacecraft and Rocets, Vol. 36, №3, May-June 1999, p.442-461.
4. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов. М.: Энергия, 1976.
5. Фей Дж., Ридделл Ф. Теоретический анализ теплообмена в лобовой точке, омываемой диссоциированным воздухом.- В кн.: Проблемы движения головной части ракет дальнего действия. М., Изд-во иностр. Лит., 1959, с. 217-256.
6. Методы расчета теплообмена на поверхности летательных аппаратов при двумерном обтекании. Справочный материал. – Калининград. Московская область. Россия. – 1992.

ДИНАМИКА ДВИЖЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 629.7

С.А. Белоглазов, В.В. Савельев

АВТОМАТИЗАЦИЯ АНАЛИЗА ДАННЫХ, ПОЛУЧАЕМЫХ В РЕЗУЛЬТАТЕ ИСПЫТАНИЙ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ БПЛА.

Предложен эффективный способ хранения и обработки больших массивов данных. Разработано программное обеспечение для автоматизации анализа данных, полученных в результате испытаний навигационных систем беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Универсальная структура хранилища обрабатываемых данных позволяет анализировать данные при использовании широкого класса навигационных систем.

1. Введение. Разработка БПЛА предполагает испытания опытных образцов готовых изделий. Сложные системы могут включать целые комплексы высокотехнологичных приборов, характеристики которых необходимо исследовать. Испытания приборов предполагают получение данных о тех или иных параметрах работы приборов штатными измерительными средствами или диагностическими средствами самих же приборов. Результаты подобных испытаний представляют собой значительные объёмы данных в цифровом виде.

Современная вычислительная техника делает доступным без повышения конечной себестоимости разработки накапливать огромные массивы статистических данных и осуществлять соответствующую итеративную обработку [1]. Рынок прикладного программного обеспечения (ПО) насыщен различными системами хранения и обработки данных. Использование коммерческих систем сторонних разработчиков может повысить эффективность отработки и исследования систем на стендовом обеспечении, снизив затраты на разработку целевого программного обеспечения и позволив разработчикам сконцентрироваться на сути исследуемых явлений.

2. Условия испытаний навигационных систем БПЛА. При полунатурных испытаниях оказывается возможным провести большое количество циклов испытаний. Одним из примеров испытаний навигационного оборудования БПЛА могут служить испытания образцов БПЛА с помощью летающих лабораторий. Такая лаборатория может быть построена на базе самолёта или вертолёта, на котором размещается

испытываемое оборудование. Программа испытаний предполагает автономную проверку отдельных систем или их комплексную проверку.

Возможный вариант структуры летающей лаборатории представлен на рис. 1. Навигационные системы включают спутниковое, инерциальное и РЛ оборудование. Кроме указанных систем, могут отрабатываться оптические датчики для регистрации информации от подстилающей поверхности в видимом или инфракрасном спектрах.

Управление испытаниями и регистрацию данных можно осуществлять, используя пульты на базе персональных ЭВМ в промышленном исполнении. Такой вариант позволяет в полной мере использовать достижения современной электроники – накопители большой ёмкости, высокопроизводительные процессоры.

Рис.1. Вариант структуры летающей лаборатории

Расчёты показывают, что объём зарегистрированных и записанных на носители данных может составить до сотен гигабайт информации в цифровом виде при длительности испытания 1,5…2 часа. Основной объём информации может возникнуть при регистрации видеосигналов с оптических датчиков или при регистрации высокочастотных сигналов с помощью АЦП. Оцифровке с последующей записью

информации в цифровом виде, к примеру, может подвергаться радиолокационный сигнал.

Аналоговый сигнал, получаемый от радиолокационной аппаратуры можно использовать в дальнейшем для получения радиолокационного изображения местности и его навигационной привязки к радиоконтрастным объектам. К примеру, при регистрации с частотой оцифровки 12 МГц 8-разрядным АЦП мы получим $12 \cdot 10^6$ [*Гц*]·60·60 [с]=43,2 [*Гб*] информации за 1 час непрерывной работы аппаратуры. Испытания могут предполагать получение и запись цифровой информации о состоянии исследуемой аппаратуры и режимах её работы, а также оцифровку аналоговых данных.

Исследование точности радиолокационной навигации предполагает параллельную регистрацию навигационной информации, получаемой, к примеру, с аппаратуры потребителя спутниковой навигации (АПСН) или инерциальной навигационной системы. На скоростях летающей лаборатории от 150 м/с (500 км/ч) оптимально регистрировать данные с этих систем, с частотой порядка 10 Гц, Таким образом, траектория движения летающей лаборатории определяется зарегистрированными записями в количестве порядка 50 000 за 1.5 часа полёта.

Для обработки больших массивов данных необходимо выбрать эффективный способ их хранения. В качестве хранилища предлагается использовать реляционную базу данных. В качестве системы управления базами данных можно использовать Microsoft SQL Server.

Эксперименты показали, что уже при нескольких миллионах записей в БД, поиск и отображение нужной информации занимает неприемлемое для интерактивной работы время. Специфика анализа данных с АЦП позволяет реализовывать хранение указанных данных в исходном виде, используя файловую систему накопителей. БД автоматизирует поиск и выбор нужной информации, храня запрашиваемые объекты.

3. Автоматизация анализа данных. Для анализа данных лётных испытаний навигационных систем необходимо связать зарегистрированные измерения с координатами находящихся на земле объектов. Привязку навигационных данных, зарегистрированных в ходе испытаний, можно осуществлять к картографическим данным из ГИС систем или к снимкам ДЗЗ. Например, в свободном доступе в Интернет в настоящий момент находятся достаточно подробные снимки земной поверхности, открытые для всеобщего обозрения компанией Coogle. В ходе исследований осуществлено моделирование навигационных данных, и разработана методика их привязки к имеющимся снимкам ДЗЗ, полученным с помощью данных, взятых из Coogle.

Главной задачей при использовании снимков Coogle является осуществление преобразования навигационных данных, получаемых при испытаниях на летающей лаборатории в систему координат имеющихся спутниковых снимков земной поверхности. Районы возможных полётов могут охватывать территории протяжённостью в несколько сотен километров. При пересчётах координат в таких масштабах необходимо выбирать соответствующую модель земной поверхности. К примеру, в данных Coogle используются координаты в WGS-84. Для обеспечения универсальности по входным навигационным данным в программном обеспечении была реализована возможность задавать любую из широко используемых в настоящее время систем. Также были реализованы алгоритмы пересчёта между ними.

Рис. 2. Результаты работы программы анализа зарегистрированной информации. Визуализация моделирования маршрута движения летающей лаборатории.

Другой немаловажной задачей было обеспечение универсальной и гибкой структуры хранимых данных. Реализованный подход к хранению данных обеспечил возможность масштабирования хранилища по видам информации. Добавление новых типов регистрирующего оборудования и новых типов данных, специфических для используемых систем возможно без изменения имеющихся структур и переработки, а зачастую, и доработки программного обеспечения, обрабатывающего данные.

Применённый к хранению данных подход также позволяет решить задачи обеспечения конфиденциальности хранимой информации.

4. Результаты. Обозначенные подходы были реализованы в виде программного обеспечения, автоматизирующего процесс анализа данных, получаемых при испытаниях навигационного оборудовании БПЛА при помощи летающих лабораторий. Для оптимального хранения и анализа данных были разработаны универсальные структуры таблиц базы данных. Реализация базы данных с последующим заполнением смоделированной информацией позволила выработать требования к техническим характеристикам оборудования регистрации и хранения данных и выработать определённые методики оптимизации хранения.

Для уточнения привязки навигационных данных к реальным объектам подстилающей поверхности были использованы снимки ДЗЗ, свободный доступ к которым предоставлен компанией Coogle. Привязка навигационных данных к спутниковым фотоснимкам позволяет визуально оценить точность привязки по положению относительно ключевых объектов (см. рис. 2). Привязка навигационной информации к спутниковым фотоснимкам позволяет проанализировать возможности радиолокационного навигационного оборудования для использования в БПЛА (см. рис. 3).

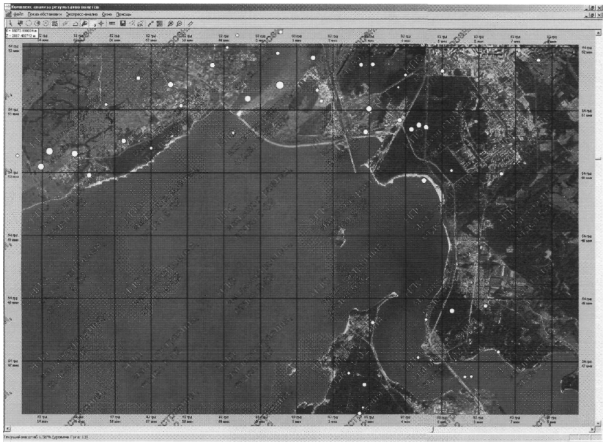


Рис. 3. Результаты работы программы анализа зарегистрированной информации. Для наглядности приведена визуализация моделирования радиолокационной навигационной информации

5. Заключение. Полученные в ходе работы результаты позволяют сделать вывод о возможности применения разработанного программного обеспечения для автоматизации анализа данных, полученных в результате испытаний навигационных систем БПЛА. Универсальная структура хранилища обрабатываемых данных позволяет анализировать данные при использовании широкого класса навигационных систем БПЛА инерциальных, спутниковых, радиолокационных, телевизионных.

При минимальных доработках разработанное программно-алгоритмическое обеспечение можно использовать для анализа данных и от других систем аналогичного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Л.М. Гольденберг, Б.Д. Матюшкин, М.Н. Поляк Цифровая обработка сигналов – Москва, «Радио и связь», 1990 г., 256 с.

УДК 001.51

А.А. Гассельблат, Ю.Ю. Желаннов,
Н.Н. Красников

РАЗРАБОТКА БАЗОВОГО МОДУЛЯ КОМПЛЕКСА СИТУАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Представлено описание базового модуля информационно-моделирующего комплекса Центра ситуационного моделирования. Указаны основные требования к моделирующим комплексам, назначение базового модуля, состав и функции его основных подсистем. Раскрыты возможности использования базового модуля в разработке моделирующих комплексов.

1. Введение. Опыт разработки и эксплуатации информационно-моделирующего комплекса в Центре ситуационного моделирования (ЦСМ) ОАО «ВПК «НПО машиностроения» показал, что при создании сложных моделирующих систем целесообразно использовать базовый модуль. Он позволяет: 1) разрабатывать на его основе подсистемы, реализующие модели предметной области; 2) использовать базовую функциональность в разрабатываемых подсистемах; 3) расширять базовую функциональность.

2. Общие требования. Базовый модуль – это набор взаимосвязанных программных средств, реализованных в виде исполняемых модулей и библиотек исходного кода. Он задает основу архитектуры разрабатываемого комплекса и предоставляет функции, используемые в подсистемах комплекса. Определены общие требования к информационно-моделирующему комплексу ЦСМ:

1). Возможность выбора вариантов моделей объектов предметной области, применения моделей в различных комбинациях, выбора и настройки параметров моделей. 2). Расчет и отображение динамических процессов должны выполняться в псевдореальном времени. 3). Наличие в составе комплекса множества автоматизированных рабочих мест (АРМ). 4). Многообразие способов представления информации для повышения качества принимаемых оператором решений. 5). Наличие средств накопления и сохранения результатов проводимых экспериментов для последующего анализа и выбора наиболее адекватных моделей или способов их применения в моделируемых ситуациях.

3. Структура и свойства подсистем. На основе общих требований была определена структура подсистем базового модуля, состав которой представлен на рис.1.

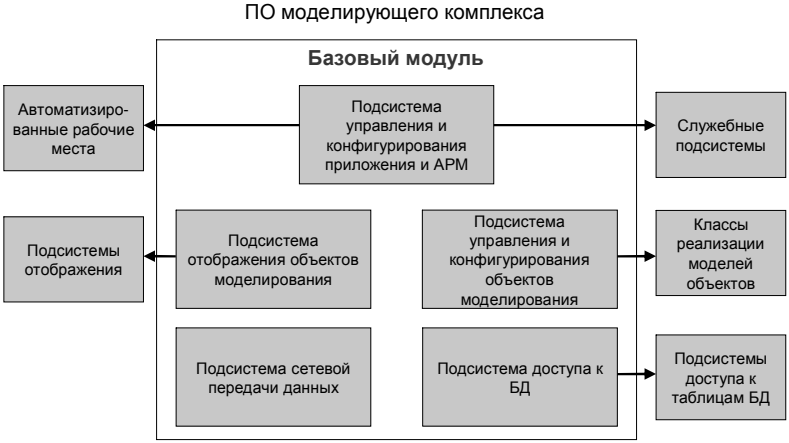


Рис.1. Состав базового модуля программного обеспечения моделирующего комплекса.

Группа классов структуры объектов определяет общую структуру и взаимосвязь программных классов, реализующих модели объектов предметной области. Структура включает базовый класс, предназначенный для включения в него композиции классов, в совокупности описывающих модель объекта предметной области (рис.2). Группа классов создания и конфигурирования объектов отвечает за сборку составных частей объекта в единую структуру, а так же при взаимодействии с подсистемой доступа к БД осуществляет конфигурирование объектов начальными и постоянными параметрами. Группа классов централизованного хранения и доступа к объектам обеспечивает функции добавления, удаления и выдачи объектов по запросу. Группа классов управления объектами осуществляет процесс изменения модельного времени и управляет вычислением состояния объектов на каждый такт модельного времени. Подсистема отображения объектов позволяет отображать средствами интерфейса пользователя состояние объектов моделирования в процессе работы программного комплекса.

В базовом модуле предусмотрен механизм так называемых «посредников» между объектами предметной области и подсистемами отображения. «Посредники», используя программный интерфейс объекта и интерфейс подсистемы отображения, берут на себя функции представления объектов в рамках подсистемы отображения, освобождая от этой функции классы реализации объектов предметной области (рис.3). Для отображения свойств объектов моделирования при реше-

нии прикладных задач в Центре ситуационного моделирования наиболее часто используются: средства геоинформационной системы (ГИС); средства 3D-графики; оконные панели свойств объектов.

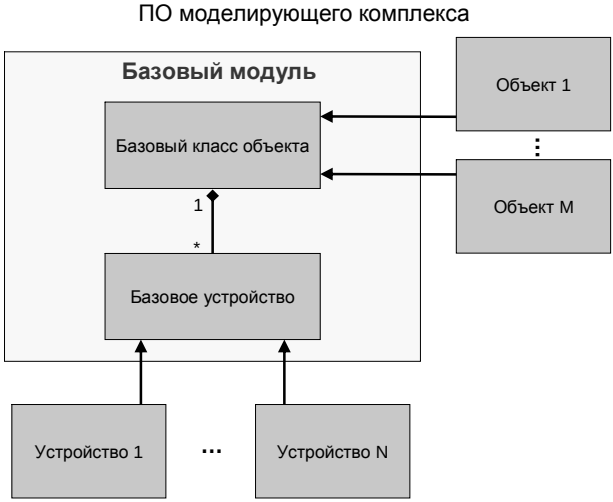


Рис.2. Диаграмма классов структуры моделей объектов в подсистеме управления и конфигурирования объектов моделирования.

Подсистема управления и конфигурирования приложения и АРМ определяет базовую структуру создаваемого приложения и АРМ в составе этой структуры (рис.4). Автоматизированное рабочее место является главной структурной единицей интерфейса оператора. АРМ определяет состав всех средств интерфейса, доступных оператору. Базовый модуль поддерживает расширяемые конфигурационные записи о составе, структуре и функциональности средств интерфейса.

Базовый модуль изначально рассчитан для разработки на его основе комплексов с распределенной клиент-серверной архитектурой. Подсистемы состоят из базовой, клиентской и серверной частей. Клиентская и серверная часть реализуют алгоритмы синхронизации состояния подсистемы на компонентах распределенного приложения (рис.5). Компоненты распределенного приложения взаимодействуют между собой по локальной вычислительной сети.

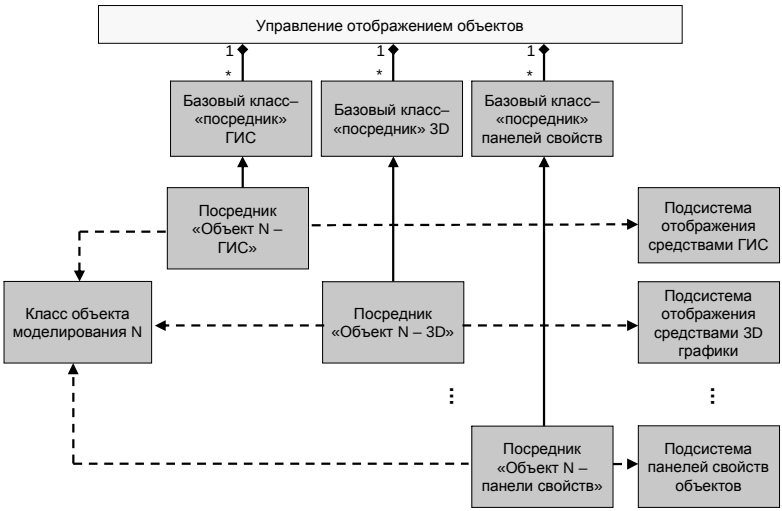


Рис.3. Диаграмма классов подсистемы отображения объектов моделирования.

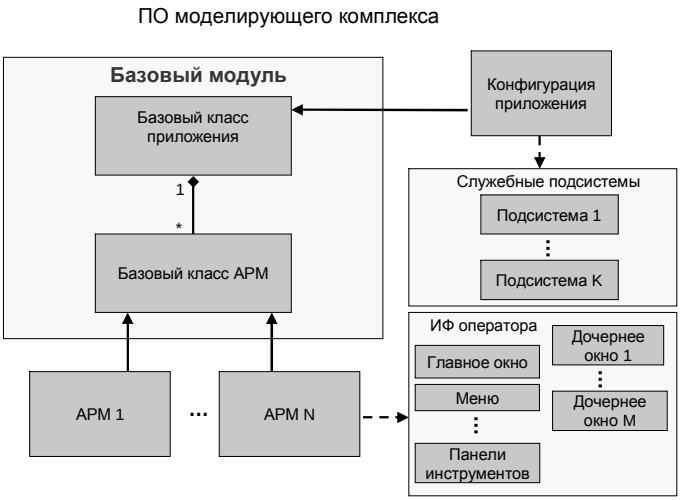


Рис.4. Диаграмма классов подсистемы управления и конфигурирования приложения и АРМ.

Подсистема сетевой передачи данных реализует базовый сетевой уровень приложения. Подсистема осуществляет связность компонентов клиент–серверной архитектуры, и обеспечивает обмен данными подсистем между компонентами распределенного приложения. Подсистема доступа к БД предоставляет компонентам приложения средства для работы с информацией, находящейся в базе данных (см. рис.6). Подсистема обеспечивает соединение с сервером БД, считывание данных, добавление, удаление и изменение информации БД. Для обеспечения информационного обмена между классами реализации объектов предметной области моделирования и БД введен механизм «посредников», аналогичный по принципам работы с «посредниками» подсистем отображения объектов.

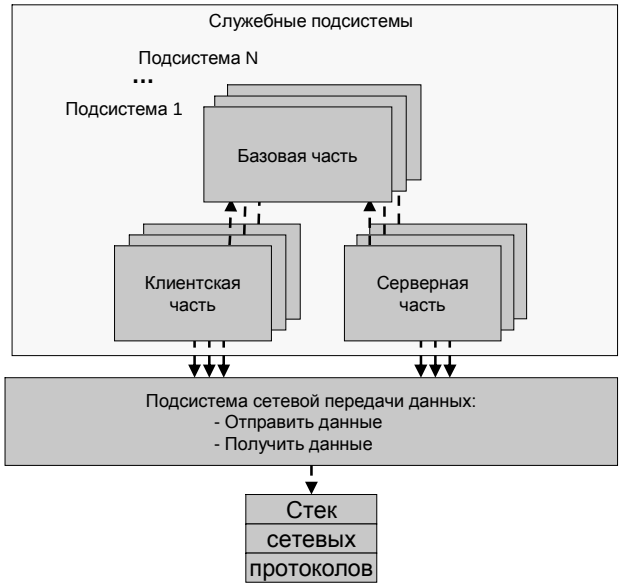


Рис.5. Схема использования функций подсистемы сетевой передачи данных.

4. Расширение функциональных возможностей. Разработка программных комплексов на основе базового модуля позволяет:
1). Использовать в новых подсистемах уже созданную функциональность. 2). Повысить вероятность безошибочной работы программного обеспечения за счет неизменности базовой функциональности. 3). Повысить устойчивость архитектуры программного обеспечения (ПО)

при внесении в него изменений, доработке и добавлении функциональности. Как следствие, это уменьшает время (стоимость) и сложность внесения последующих изменений, создавая предпосылки к увеличению срока эксплуатации программного обеспечения. 4). Прийти к повторяемости действий этапов процесса разработки, что создает предпосылки к оптимизации этого процесса.

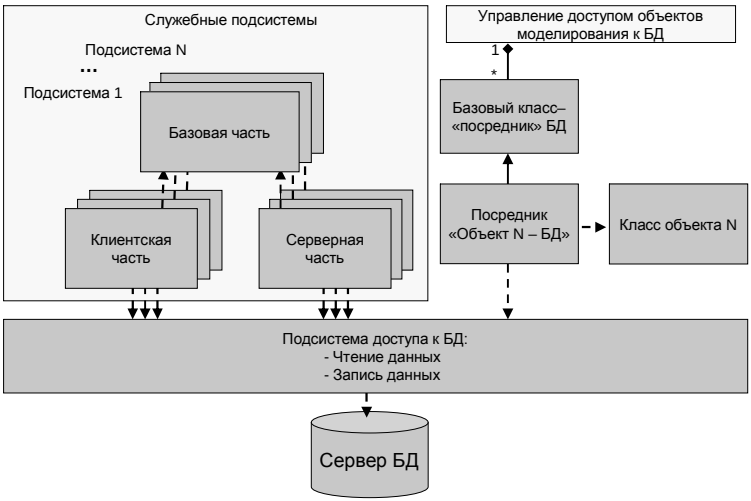


Рис.6. Схема использования функций подсистемы доступа к БД.

Разработанный базовый модуль используется при решении прикладных задач ситуационного моделирования как в традиционной для ЦСМ области, так и в новой для него социально-экономической сфере. Примером является Информационно-моделирующий комплекс для администрации города Реутов, который позволяет производить:

1). Сбор и автоматизированную обработку показателей и индикаторов социально-экономического развития муниципального образования и другой информации. 2). Обеспечение функционирования электронной библиотеки информационно-справочных текстовых, фото и видеоматериалов. 3). автоматизированную подготовку и представление информации в заданных форматах. 4). решение информационно-аналитических задач для обеспечения подготовки и принятия решений по основным направлениям деятельности администрации муниципального образования. 5). Обеспечение формирования и функционирования интегрированных баз данных по состоянию объектов и ди-

намики их изменения, в качестве справочных информационных ресурсов для поддержки принятия управленческих решений.

5. Выводы. Использование базового модуля в процессе разработки сложных информационно-моделирующих комплексов позволяет: сократить время разработки за счет использования базовой функциональности; повысить вероятность безошибочной работы создаваемого программно-математического обеспечения (ПМО) за счет неизменности базовой функциональности; увеличить срок эксплуатации ПМО за счет особенности базовой архитектуры, позволяющей изменять и расширять функциональность приложения; Использование базового модуля в Информационно-моделирующем комплексе ЦСМ позволило увеличить количество исследуемых в ходе эксперимента объектов и процессов функционирования сложных систем при вычислениях в псевдореальном времени с одновременной визуализацией процесса моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александреску А. Современное проектирование на C++. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2002.
2. Гамма Э., Хелм Р., Джонсон Р., Влиссидес Дж. Приемы объектно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования. – СПб: Питер, 2001.
3. Фатеев В.Ф., Елисеев А.М. и др. Базовая конфигурация информационно-моделирующей системы комплекса средств наблюдения и воздействия. // Отчет о НИОКР, СПб, ВИКУ им. А.Ф.Можайского, 2003.

УДК 62-50:629

Р.П. Симоньянц

КВАНТОВЫЕ И СИНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РЕЛЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Рассматриваются релейные системы с нейтральным объектом и постоянным возмущением, моделирующие динамику широкого класса технических систем, как например систем стабилизации КЛА. Показано, что, при жестком управлении системы обладают квантовыми и синергетическими свойствами: расход энергии в предельных циклах квантуется по возмущению; расходная характеристика имеет вид каскада бифуркаций; существует странный аттрактор; наблюдаются явления самоорганизации предельных циклов. Выводы подтверждаются численными экспериментами.

1. Введение. Еще в 1963 году Э.В. Гаушус [2] опубликовал результаты исследования динамики стабилизации космического летательного аппарата (КЛА) при импульсном управлении со специальным алгоритмом формирования управляющего сигнала. В этой импульсной системе впервые были обнаружены квантовые свойства автоколебательных режимов. Было показано, что при изменении возмущающего момента расход рабочего тела обладает свойством квантования.

Об этом говорилось в обзорном докладе академиков Б.Н. Петрова и Б.В. Раушенбаха на II Международном симпозиуме ИФАК как о новом в то время, неожиданном результате в теории автоматического управления [1]. Однако, должного развития результат этот не получил, а упомянутая работа с тех пор осталась в научной литературе как частный случай разрывных автоколебаний в одной импульсной системе.

В настоящей работе рассматривается применяемый в различных задачах управления и особенно широко распространенный в космической технике класс релейных систем стабилизации. Исследуется задача стабилизации нейтрального объекта при линейном формировании управляющего сигнала. Благодаря уникальным возможностям, которые предоставляют современные компьютерные технологии в сочетании с методами качественного анализа динамических систем, автору удалось впервые раскрыть не только квантовые, но и синергетические свойства этой системы.

Оказалось, что она, как и импульсная система Гаушуса, в определённых условиях самопроизвольно квантует энергетические уровни предельных циклов при квазистатическом изменении возмущающего

воздействия. В этой простой и, казалось бы, хорошо изученной релейной системе с нейтральным объектом обнаружены удивительные явления, интенсивно изучаемые в последние годы синергетикой [5]. Аналогичные явления ранее нами были обнаружены в релейной системе, но с неустойчивым объектом [3]: самоорганизация, масштабная инвариантность, динамический хаос. Как выяснилось, и в рассматриваемой системе с нейтральным объектом при определённом, сверхкритическом сочетании параметров и при малом, но отличном от нуля возмущении возникает, как показано ниже, особый режим сложного движения – странный аттрактор. К странному аттрактору ведёт каскад бифуркаций усложнения формы предельных циклов.

Полученные в работе результаты, раскрывая новые свойства широко известной релейной системы, дают ключ к решению задач синтеза более совершенных алгоритмов управления.

2. Динамическая модель. Рассматриваются релейные динамические системы, математическое описание которых имеет вид:

$$\begin{cases} \dfrac{dx}{dt} = y, \ \dfrac{dy}{dt} = g - u(x,y), \\ u = -a \cdot F(\sigma), \qquad \sigma = x + k \cdot y, \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases} F(\sigma) = \operatorname{sgn}\sigma \quad при \ -\alpha < \sigma < +\alpha; \\ F(\sigma) = 0 \qquad при \ -\alpha + h < \sigma < +\alpha - h; \\ F(\sigma) = F_o \qquad при \ |\sigma| \in [\alpha, \alpha - h], \ F_o(t) = F(t-0), \end{cases} \tag{2}$$

где x, y – фазовые координаты; u и g – управляющее и возмущающее воздействие соответственно; a – модуль управляющего воздействия; σ – управляющий сигнал; k – коэффициент усиления по скорости; $F(\sigma)$ – релейная *функция* управления общего вида. В (2) обозначено: α – порог срабатывания; h – ширина петли гистерезиса; $F_o(t)$ – значение функции $F(\sigma)$ в предыдущий момент времени (предыстория F). Таким образом, функция $F(\sigma)$ в зоне гистерезиса неоднозначна: её значение определяется тремя переменными: $F = F(x, y, F_o)$.

3. Фазовая поверхность. Как следует из (1), фазовые траектории рассматриваемой системы представляют собой три семейства параболических траекторий $\Gamma^+, \Gamma^-, \Gamma^o$. Каждое из них принадлежит соответствующему листу $\Phi, ^+\Phi, ^-\Phi^o$ фазовой поверхности. Границы листов согласно (1), (2):

$$L_i: \quad x + k \cdot y = c_i, \ \ c_i = \text{const}, \ \ i = \overline{1;4}. \tag{3}$$

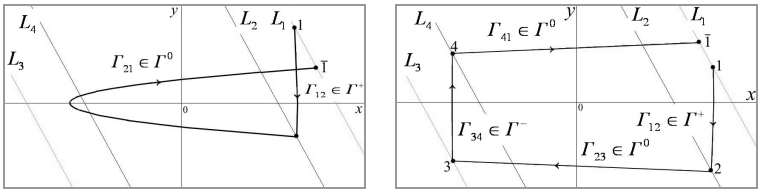
Любую траекторию можем представить как объединение (последовательное «сшивание») элементарных (кусочных) траекторий:

$$\Gamma_{12} \in \Gamma^{+} \subset \Phi^{+}; \quad \Gamma_{34} \in \Gamma^{-} \subset \Phi^{-}; \quad \Gamma_{21}, \Gamma_{23}, \Gamma_{41} \in \Gamma^{0} \subset \Phi^{0}.$$

Сложную траекторию переходного или установившегося движения представляем как объединение траекторий простых циклов двух типов (рис. 1): одноимпульсных Γ_1 и двухимпульсных Γ_2:

$$\Gamma_1 = \Gamma_{12} \bigcup \Gamma_{21} \quad \forall g > 0; \quad \Gamma_1 = \Gamma_{34} \bigcup \Gamma_{41} \quad \forall g < 0;$$

$$\Gamma_2 = \Gamma_{12} \bigcup \Gamma_{23} \bigcup \Gamma_{34} \bigcup \Gamma_{41}.$$



а) б)

Рис. 1. Траектории простых циклов а) Γ_1 и б) Γ_2

Замыкание траекторий простых циклов дает соответствующие простые предельные циклы – образы простых автоколебательных состояний системы: $\Gamma_n \to \Gamma_n^*, \quad n = 1; 2.$

В пространстве параметров модели (1), (2) существует область, которой отвечают такие динамические системы, фазовые поверхности которых содержат только простые предельные циклы. Многоимпульсные режимы автоколебаний в них отсутствуют. Такие системы характеризуются относительно малыми величинами управляющих воздействий. Назовем их системами «мягкого» управления. Можно указать и такие области пространства параметров, которым соответствуют динамические системы, на фазовой поверхности которых существуют сложные, многоимпульсные (мультиплетные) предельные циклы. В них управляющие воздействия велики. Часто такие системы моделируют как разрывные. Назовём их системами «жёсткого» управления.

В системе жесткого управления каждый многоимпульсный предельный цикл с числом импульсов управляющего воздействия $n > 2$ представляет собой объединение r двухимпульсных циклов, замыкаемых одним одноимпульсным:

$$\Gamma_n = \Gamma_1 \bigcup \left(\bigcup_{i=1}^{r} (\Gamma_2)_i \right), \quad n = 2r - 1, \quad r \in \{1, 2, 3, ...\}. \qquad (4)$$

4. Отыскание предельных циклов. Следуя принципам теории точечных отображений [2], для определения простых и сложных предельных циклов осуществляем преобразования линий переключения:

$T_{i,j}$: $y_j = f_{i,j}(y_i)$, $i,j \in \{1,2,3,4\}$, где $T_{i,j}$ – оператор преобразования линии L_i в линию L_j, осуществляемого соответствующими кусками фазовых траекторий $\Gamma_{i,j}$; $y_j = f_{i,j}(y_i)$ – функция соответствия этого преобразования.

По логике (4) объединения кусков траекторий, строим точечные отображения (отображения Пуанкаре) T_n: $\overline{y}_i = f_n(y_i)$, где T_n – оператор преобразования линии без контакта L_i в себя, осуществляемого кусочно-непрерывными фазовыми траекториями Γ_n простых или сложных циклов. В качестве линии без контакта принимаем прямую L_1 при $g > 0$ и линию L_3 – при $g < 0$. Отыскание n-импульсного предельного цикла Γ_n^* сводим к определению неподвижных точек y_1^* – преобразования, т.е. к решению уравнения

$$\overline{y}_1 - f_n(y_1) = 0, \quad \overline{y} = y_1 \Rightarrow y_1^*, \quad (x_1^*, y_1^*) \in \Gamma_n^*. \qquad (5)$$

В аналитической форме точное решение уравнения (5) для неподвижных точек легко получается только для простого одноимпульсного предельного цикла Γ_1^*. В остальных случаях имеем трансцендентное уравнение, которое решаем итерационным методом. Геометрическая интерпретация итерационного решения представляет собой диаграмму Ламерея, а условие его устойчивости определяется теоремой Кёнигса. Методические аспекты выполненных автором построений точечных отображений представляют самостоятельный интерес и в рамках настоящей работы не рассматриваются. Не вдаваясь в подробности технологии вычислений, изложим некоторые результаты исследований, полученные методом точечных отображений [2] и подтвержденные компьютерным моделированием [4].

5. Параметр расхода энергии. Затраты энергии или рабочего тела (топлива) на поддержание системой определённого автоколебательного состояния пропорциональны суммарной длительности работы исполнительных органов. Параметром, характеризующим интенсивность расхода энергии (затрачиваемую мощность) в предельном цикле Γ_n^*, является безразмерная величина λ_n^*, называемая скважностью. Она показывает, какую долю времени за период или за любой кратный ему интервал времени работали исполнительные органы:

$$\lambda_n^* = \frac{1}{T_n^*}\left(\sum_{i=1}^{N^+}\theta_i^+ + \sum_{j=1}^{N^-}\theta_j^-\right), \quad n = N^+ + N^-, \qquad (6)$$

где θ_i^+, θ_j^- длительность *i*-ого положительного ($F=+1$) и *j*-ого отрицательного ($F=-1$) импульсов; N^+, N^- – число положительных и отрицательных импульсов в предельном цикле соответственно.

Для простых предельных циклов Γ_1^*, Γ_2^* имеем:

$$\lambda_1^* = \theta_i^+ \left(T_1^*\right)^{-1}; \quad \lambda_2^* = \left(\theta_1^+ + \theta_2^-\right)\left(T_2^*\right)^{-1}$$

Период простейшего из многоимпульсных предельных циклов Γ_3^* (символ * для упрощения записи опускаем):

$$\begin{cases} T_3 = \theta_1^+ + t_{2,1} + \theta_2^+ + t_{2,3} + \theta_1^- + t_{4,1}; \\ \theta_1^+ = t_{1,2} = t_2 - t_1; \quad t_{2,1}=t_1' - t_2; \quad \theta_2^+ = t_{1,2}' = t_2' - t_1'; \\ t_{2,3}'=t_3 - t_2'; \quad \theta_1^- = t_{3,4} = t_4 - t_3; \quad t_{4,1}=t_1'' - t_4, \end{cases}$$

где обозначено t_i, t_i', t_i'' – соответственно время первого, второго и третьего моментов переключения релейной функции $F\left[\sigma(t)\right]$ при пересечении изображающей точкой линии переключения L_i (3); $t_{i,i+1}$ – интервал времени движения от точки *i* на линии L_i до точки *i* + 1 на линии L_{i+1}. В соответствии с (4), период T_3 можем представить в виде: $T_3 = T_1 + T_2; \quad T_1 = \theta_1^+ + t_{2,1}; \quad T_2 = \theta_2^+ + t_{2,3} + \theta_1^- + t_{4,1}$. Тогда период любого сложного многоимпульсного предельного цикла равен

$$T_n = T_1 + \sum_{i=1}^{r} \left(T_2\right)_i; \quad i = \overline{1,r}; \quad r = \frac{n-1}{2}; \quad n > 2;$$

$$T_1 = \theta_1^+ + t_{2,1}; \quad \left(T_2\right)_i = \left(\theta_2^+\right)_i + \left(t_{2,3}\right)_i + \left(\theta_1^-\right)_i + \left(t_{4,1}.\right)_i.$$

6. Баланс импульсов. Расход энергии на управление объектом в состоянии, отвечающем траектории предельного цикла, зависит от формы траектории и величины возмущающего воздействия. Форма траектории определяется параметрами регулятора. Минимальным затратам на управление при действии возмущения соответствует простой одноимпульсный предельный цикл Γ_1^*. Действительно, за период T_1^* изображающая точка возвращается в исходное состояние. Следовательно, соблюдается баланс количества движения: импульс управления точно компенсирует импульс возмущения. Тогда, если возмущающее воздействие постоянно, можно записать инвариант $T_1^* g = \theta_i^+ a$, откуда сразу получаем значение скважности любого одноимпульсного предельного цикла:

$$\lambda_1^* = \theta_i^+ / T_1^* = g/a \ . \qquad (7)$$

Очевидно, что λ_1^* – минимально возможное значение расхода энергии при данном возмущении.

Применяя тот же физический подход, можем утверждать, что для любого простого или сложного предельного цикла Γ_n^* должно выполняться условие баланса импульсов управления и импульса возмущения, поскольку за время периода T_n^* изображающая точка возвращается в исходное состояние на любой замкнутой траектории. Запишем инвариантное соотношение, выражающего условие баланса количества движения для многоимпульсного предельного цикла:

$$T_n^* g - \left(\sum_{i=1}^{N^+} \theta_i^+ - \sum_{j=1}^{N^-} \theta_j^+ \right) a = 0 \, . \qquad (8)$$

Здесь первое слагаемое – импульс возмущения, второе – импульс управляющего воздействия (изменение количества движения).

7. Принцип избыточности управления. В одноимпульсном предельном цикле импульс возмущения уравновешивается единственным управляющим импульсом противоположного знака. Это означает, что при данном возмущении система работает в режиме выдачи минимально достаточного импульса управления, наиболее рационально затрачивая свои энергетические ресурсы. Во всех иных предельных циклах существуют импульсы того же знака, что и возмущение. Они могут рассматриваться как «псевдовозмущение», вынуждающее систему дополнительно затрачивать энергию.

Сформировать экономичные режимы одноимпульсных предельных циклов можно за счет надлежащего выбора параметров управляющей функции $F(\sigma)$ в (1), (2). Однако такой выбор ограничен. Ограничение обусловлено величиной минимально допустимого импульса управления:

$$\Delta = \min\left(\theta_i^+ a\right) . \qquad (9)$$

Если в заданном интервале значений возмущения g невозможно подобрать регулируемые параметры системы (настройки регулятора) так, чтобы установился одноимпульсный предельный цикл Γ_1^*, в котором величина импульса управления удовлетворяла бы условию $\theta_i^+ a \geq \Delta$, то такое управление будем называть избыточным. Геометрический смысл этого условия заключается в том, что при $\theta_i^+ a = \Delta$ кусок параболической траектории $\Gamma_{21} \in \Gamma^0$ из-за малости g вытянут на-

столько, что на листе Φ^0 не может разместиться. Критический случай отвечает условию касания траектории Γ_{21} и линии L_3. При этом наступает бифуркация, сопровождающаяся усложнением цикла – присоединением одного двухимпульсного цикла Γ_2^*. В результате рождается новый предельный цикл Γ_3^*, уровень энергетических затрат в котором примерно в три раза больше, чем в одноимпульсном. Присоединившиеся два импульса имеют противоположные знаки и разные значения по модулю. Они компенсируют избыточность управления, сообщая объекту псевдовозмущение, импульс которого равен разности присоединенных управляющих импульсов. Продолжая уменьшать возмущение g, вновь достигаем критического состояния, когда системе необходима новая порция псевдовозмущения, компенсирующего избыточность управления. Наступает новая бифуркация усложнения цикла путём присоединения следующей пары управляющих импульсов. Этот процесс может продолжаться, порождая каскад бифуркаций.

В системе с избыточным управлением расход всегда превышает минимально достаточную величину энергии и система нерационально её тратит. Действительно, какова бы не была величина Δ (9), всегда можно указать такое критическое значение g_k, что если $g \le g_k$, то управление избыточно.

8. Квантование энергии. Поскольку минимальная достаточность управления за период предельного цикла Γ_n^* определяется величиной $T_n^* g$, а реальное значение суммарного импульса по модулю равно $\lambda_n^* T_n^*$, то перерасход энергии при избыточном управлении, учитывая (6) и (8), можно оценить по формуле:

$$\eta_n = \frac{\sum\limits_{i=1}^{N^+} \theta_i^+ + \sum\limits_{j=2}^{N^-} \theta_j^-}{\sum\limits_{i=1}^{N^+} \theta_i^+ - \sum\limits_{j=2}^{N^-} \theta_j^-} = \frac{\lambda_n}{g/a}, \quad n \ne 2 . \qquad (10)$$

При бифуркации перехода от одного предельного цикла к другому, в котором число импульсов самопроизвольно увеличивается или уменьшается на две единицы, соответственно и коэффициент η_n изменяется скачком примерно на две единицы. В системе с большой избыточностью управления для предельных циклов одной и той же формы с изменением возмущения этот коэффициент меняется незначительно. Для небольших значений n приближенно можно принять $\eta_n = \text{const}$.

Например, для Γ_1^* точно $\eta_1 = 1$, для Γ_3^* $\eta_3 \approx 3$. В общем случае при $n \gg 1$ $\eta_n \neq n$.

Расходную характеристику представим в виде:

$$\lambda_n = \eta_n \cdot (g / a) \qquad (11)$$

Величина η_n характеризует энергетический уровень предельного цикла Γ_n^*. Назовем η_n квантовым числом, определив его формулой:

$$\eta_n = \frac{\varepsilon_n + 1}{\varepsilon_n - 1}, \quad \text{где} \quad \varepsilon_n = \left(\sum_{i=1}^{N^+} \theta_i^+ \right) \cdot \left(\sum_{j=2}^{N^-} \theta_j^- \right)^{-1}. \qquad (12)$$

Для рассматриваемой в работе [1] импульсной системы со специальным алгоритмом управления имеем $\eta_n = n$:

$$\lambda_n = n \cdot (g/a), \quad n = 1, 3, 5, 7\ldots$$

В рассматриваемой нами релейной системе картина иная. В ней, как показывают результаты численных исследований, с изменением возмущения g в пределах существования одной и той же формы Γ_n^* может изменяться и η_n (11), поскольку изменяются длительности управляющих импульсов.

9. Диаграмма расхода. Рассмотрим конкретный пример динамики релейной системы с жестким управлением, параметры которой имеют значения: $a = 1\ \textit{град} \cdot c^{-2}$; $\alpha = 0,4^o$; $h = 0,15^o$; $k = 1\ c$.

Проведены численные эксперименты, устанавливающие зависимость расхода энергии λ_n от безразмерного возмущения $p = g/a$ при квазистатическом изменении в пределах от 0 до 0,02. Изменение p сопровождается бифуркациями предельных циклов. Последовательность бифуркационных изменений и формы траекторий соответствующих предельных циклов представлены на рис. 2.

Для каждого значения возмущающего воздействия имеем конкретную динамическую систему. Определяем для неё возможные предельные циклы (один или два) и их параметры. Накопив достаточный массив вычисленных значений, строим расчётный график функциональной зависимости (10). С особой тщательностью эксперименты проводим в окрестности бифуркационных значений. В результате выполненных экспериментов была получена искомая расходная характеристика $\lambda_n = \eta_n \cdot (g / a)$, представленная в виде диаграммы на рис. 3.

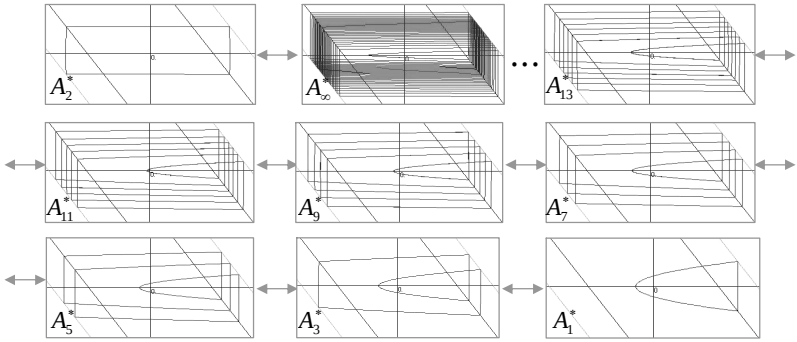


Рис. 2. Схема последовательных бифуркаций предельных циклов

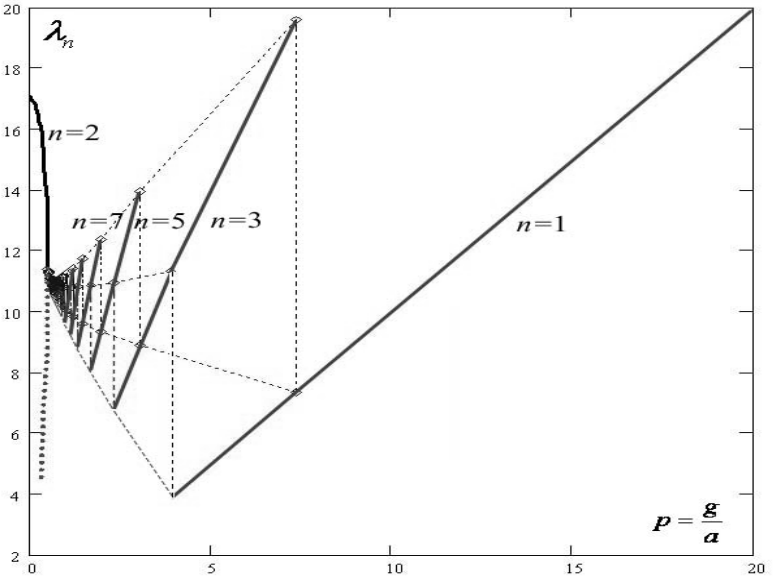


Рис.3. Бифуркационная диаграмма расхода энергии

При уменьшении параметра p наблюдаем каскад бифуркаций усложнения предельных циклов. Схема этого процесса имеет вид:

$$\Gamma_1^* \xrightarrow{\downarrow p_{1\to 3}} \Gamma_3^* \xrightarrow{\downarrow p_{3\to 5}} \Gamma_5^* \xrightarrow{\downarrow p_{5\to 7}} \Gamma_7^* \to \ldots \to \Gamma_{n-2}^* \xrightarrow{\downarrow p_{n-2\to n}} \Gamma_n^* \to$$
$$\xrightarrow{\downarrow p_{n\to n+2}} \Gamma_{n+2}^* \to \ldots \to \Gamma_\infty^* \xrightarrow{\downarrow p_{\infty\to 2}} \Gamma_2^*.$$

Здесь $\downarrow p_{n\to n+2}$ – бифуркационное значение возмущения p в момент перехода от Γ_n^* к Γ_{n+2}^* при его квазистатическом уменьшении. $\lambda_n^{n\to n+2}$ и $\lambda_{n+2}^{n\to n+2}$ – соответствующие значения расхода энергии до и после бифуркации. Γ_∞^* – странный аттрактор – предельный цикл с бессчетным количеством импульсов $(n\to\infty)$. Он существует при сверхкритическом значении параметра возмущения p_∞. Расход энергии системы в этом состоянии равен λ_∞^*. При увеличении параметра p имеем:

$$\Gamma_2^* \xrightarrow{\uparrow p_{2\to\infty}} \Gamma_\infty^* \to \ldots \to \Gamma_{n+2}^* \xrightarrow{\uparrow p_{n+2\to n}} \Gamma_n^* \xrightarrow{\uparrow p_{n\to n-2}} \Gamma_{n-2}^* \to \ldots$$
$$\ldots \xrightarrow{\uparrow p_{7\to 5}} \Gamma_5^* \xrightarrow{\uparrow p_{5\to 3}} \Gamma_3^* \xrightarrow{\uparrow p_{3\to 1}} \Gamma_1^*.$$

При этом параметры в моменты бифуркаций принимают значения:

$$\uparrow p_{n\to n-2} \Rightarrow \Gamma_n^* \to \Gamma_{n-2}^* : \lambda_n^{n\to n-2} \cong 3\lambda_{n-2}^{n\to n-2} \ .$$

10. Анализ режимов. Рассматриваем весь спектр возможных в системе динамических режимов для значений параметра возмущения $p \in \{0, p_{\max}\} = \bigcup_n P_n$, $n = 1,3,5,\ldots\infty,2$. Каждое из этих подмножеств $P_n = \{p : p_{n\to n+2} \le p \le p_{n\to n-2}\}$ определяет область существования предельного цикла Γ_n^*. Граничным точкам подмножеств $p_{n\to n+2} = \inf P_n$ и $p_{n\to n-2} = \sup P_n$ соответствуют метастабильные состояния: в системе происходят бифуркационные переходы от Γ_n^* к Γ_{n+2}^* и Γ_{n-2}^*.

Подмножество P_n частично перекрывается подмножествами P_{n+2} и P_{n-2}, образуя такие подмножества, которым отвечают неоднозначные состояния системы. В подмножестве $P_{n+2,n} = P_{n+2} \cap P_n$ существуют как Γ_n^*, так и Γ_{n+2}^*, а в $P_{n-2,n} = P_{n-2} \cap P_n$ – как Γ_n^*, так и Γ_{n-2}^*. К какому из двух режимов придёт система, зависит от начальных условий: на фазовой поверхности каждый предельный цикл имеет свою область притяжения $\Omega_n^* = \{(x_o, y_o) : \Gamma \to \Gamma_n^*\}$.

Подмножество P_1 принадлежит области мягкого управления, при котором реализуется предельный цикл Γ_1^*. Верхний предел P_1, величина $p_{\max}$ = 0,02 выбрана из условий достаточной близости к ис-

следуемой области жесткого (избыточного) управления. С уменьшением возмущения, при достижении критического значения $p_{1\to 3}$, управление становится избыточным, метастабильный режим Γ_1^* исчезает и возникает предельный цикл Γ_3^*. Он существует на отрезке $p \in \left[p_{3\to 5}, p_{3\to 1}\right]$. На верхней границе $p_{1\to 3}$ исчезает Γ_3^* и остается единственно возможный при $p > p_{1\to 3}$ предельный цикл Γ_1^*.

Квазистатическое уменьшение возмущения приводит к последовательным бифуркациям усложнения предельных циклов. Каждый вновь рожденный, более сложный предельный цикл имеет более высокий уровень расхода энергии, более узкую область определения функции расхода. С ростом *n* подмножества P_n сжимаются в точку P_∞. Сжимаются и области значений функции $\lambda_n = \lambda_n(p)$, $n = 1,3,5,...,\infty$ в точку λ_∞. Каскад бифуркаций предельных циклов стягивается к особой точке $(p_\infty, \lambda_\infty)$, соответствующей бесконечно сложному предельному циклу – странному аттрактору Γ_∞^*. Расход энергии в режиме Γ_∞^* не превосходит среднего значения в режиме любого из многоимпульсных циклов.

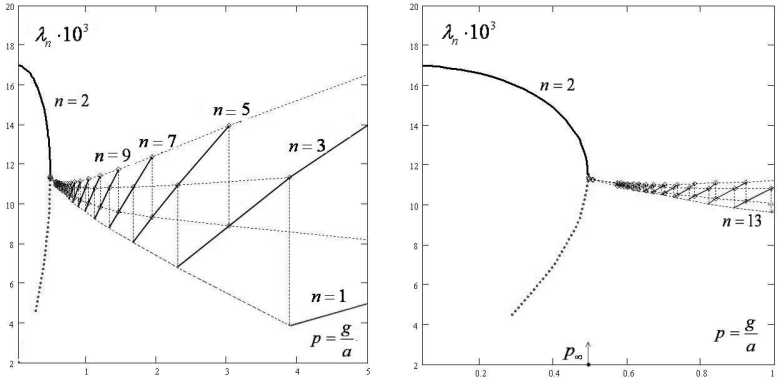


Рис. 4. Фрагменты диаграммы расхода при увеличении масштаба

Бифуркационная диаграмма расхода энергии в области многоимпульсных придельных циклов проявляет свойства масштабной инвариантности: увеличение масштаба по оси возмущений даёт самопо-

добные графические структуры для функций расхода $\lambda_n = \lambda_n(p)$ (рис. 4). Однако окрестность странного аттрактора детально не изучалась.

Рассмотрим принципиальные особенности диаграммы расхода. Абсолютный минимум затрат энергии на автоколебания система имеет в точке бифуркации метастабильного одноимпульсного предельного цикла $\left(\Gamma_1^*\right)_{1\to 3}$: $\lambda_{1\min}$ при $p_{1\to 3}$. Расход $\lambda_n = \lambda_n(p)$ $\forall n \geq 3$ в пределах $p \in P_n$ практически линейно растёт с ростом возмущения. При этом граничные значения расхода $\lambda_{n\to n-2}$ и $\lambda_{n\to n+2}$ сближаются так, что средняя величина сохраняет примерно постоянное значение. Совершенно иной вид имеет функция $\lambda_2 = \lambda_2(p)$, $\forall p < p_\infty$: при возрастании возмущения расход энергии падает, в то время как в многоимпульсных циклах, наоборот, возрастает. Объясняется это тем, что система обладает синергетическим свойством самоорганизации: в области существования каждой формы (структуры) предельного цикла при изменении возмущения фазовые траектории самопроизвольно трансформируются так, что затраты энергии минимизируются. Это иллюстрирует квантовая диаграмма энергетических уровней предельных циклов $\eta_n(p)$, представленная на рис.5.

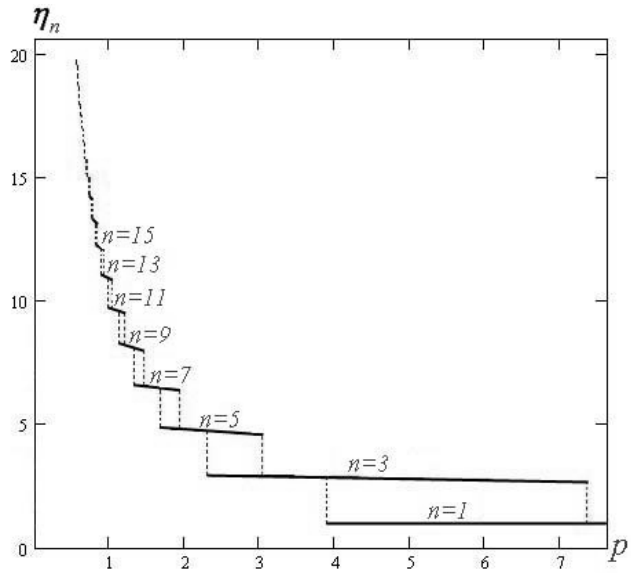


Рис. 5. Квантовая диаграмма энергетических уровней

Сущность явления заключается в следующем. Пусть система находится под действием возмущения $p_1 \in P_n$ и её состояние определяется предельным циклом $\left(\Gamma_n^*\right)_1$. Внезапно возмущение изменилось на величину Δp, при этом $p_2 \in P_n$, $p_2 = p + \Delta p$. В результате действия присущего системе внутреннего механизма самоорганизации в ней возбуждаются перестроения фазовых траекторий и устанавливается такая траектория предельного цикла $\left(\Gamma_n^*\right)_2$, для которой расход энергии будет соответствовать тому же энергетическому уровню η_n. Для данного возмущения $p + \Delta p$ и данной формы предельного цикла Γ_n^*, этот расход минимален. Именно этим механизмом самоорганизации системы с формированием наиболее экономичного предельного цикла и объясняется характер диаграммы расхода и свойство квантования.

11. Выводы. Применением теории точечных отображений, современных компьютерных технологий и метода качественного анализа динамических систем проведены исследования энергетических характеристик релейной системы с нейтральным объектом и постоянным возмущением, упрощенно моделирующей динамику стабилизации КЛА. Получены новые, ранее неизвестные результаты.

При малых возмущениях и избыточном (жестком) управлении расход энергии многократно превышает физически необходимую величину. Показано, что в этих условиях рассматриваемая система обладает синергетическими свойствами. Наблюдаются явления самоорганизации предельных циклов, обеспечивающие самопроизвольную минимизацию затрат энергии на уровне, соответствующем форме предельного цикла. Расход энергии в различных режимах автоколебаний самопроизвольно квантуется в соответствии с уровнем возмущающего воздействия. Существует особое состояние – странный аттрактор, к которому ведет каскад бифуркаций при квазистатическом уменьшении возмущения. Расход энергии в режиме странного аттрактора не превышает среднего расхода в многоимпульсных циклах и значительно ниже, чем расход при отсутствии возмущения. Абсолютный минимум расхода энергии система достигает в метастабильном одноимпульсном предельном цикле в точке бифуркации.

Полученные результаты позволяют глубже понять физическую сущность процессов, протекающих в рассматриваемой системе, и найти новые подходы к решению актуальной задачи синтеза более совершенного управления, обеспечивающего минимальные расходы энергии во всей области изменения возмущающего воздействия.

Выполнен большой объём численных экспериментов, подтверждающих выводы. Автор выражает признательность Куркову М.А. за помощь в проведении экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров Б.Н., Раушенбах Б.В. Советские работы по автоматическому управлению в космосе (1957 – 1967 гг.) / Сб.: Управление космическими аппаратами и кораблями: ТР. II Международного симпозиума ИФАК по автоматическому управлению в мирном использовании косм. пространства. – М.: Наука, 1971. С. 11 –18.
2. Гаушус Э.В. Исследование динамических систем методом точечных преобразований. Глав. Ред. Физ.-мат. литературы изд-ва «Наука», – М.,1976. – 368с.
3. Симоньянц Р.П. Каскад бифуркаций в нелинейной системе управления неустойчивым объектом //Аэрокосмические технологии: Труды Всероссийской научно-технической конференции (22 мая 2002, Реутов, ФГУП «НПО машиностроения») – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2003. – С. 187 – 196.
4. Симоньянц Р.П., Будыка С.М. Компьютерная модель нелинейной динамики угловой стабилизации космического аппарата // Аэрокосмические технологии: Труды Всероссийской научно-технической конференции (22 мая 2002, Реутов, ФГУП «НПО машиностроения») – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2003. – С. 197.
5. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: Теория системного синтеза.– М.: КомКнига, 2006. – 240с.

УДК 629.78

П.В. Аверьянов, Э.Д. Суханов

РАЗРАБОТКА АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ИНТЕРАКТИВНОГО УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО СТЕНДА

Представлена разработка программно-аппаратных средств интерактивного моделирующего стенда для исследования динамики полета ракеты-носителя при выведении на околоземную орбиту КЛА. Тестовый пример расчета даёт хорошее совпадение с результатами лётных испытаний.

1. Введение. Непрерывный рост сложности и ответственности ракетных и космических комплексов, ужесточение допусков на оценки их качества и надежности, быстрый рост объема и функциональной значимости бортового и наземного программно-математического обеспечения требует применения в процессах обучения и исследования динамики ракет и космических кораблей (КК) высокоэффективных компьютерных технологий.

В работе представлены результаты разработки программно-аппаратных средств интерактивного моделирующего стенда (ИМС) для исследования динамики полета ракеты-носителя при выведении на околоземную орбиту пилотируемого КК.

2. Принцип функционирования и структура стенда. С целью повышения эффективности процессов обучения, проектирования и исследования движения рассматриваемых сложных систем при разработке аппаратно-программных средств использован принцип интерактивности с применением унификации, модульности, рациональной организации взаимодействия основных частей стенда.

Стенд (программно-аппаратные средства) разработан для математического компьютерного моделирования полета ракеты-носителя на участке выведения КК на околоземную орбиту. Он решает следующие задачи: 1). Определение основных параметров траектории движения ракеты-носителя на этапе предварительного баллистического проектирования, когда весовые, тяговые и геометрические характеристики РН окончательно не определены [1]. 2). Исследование влияния на результат моделирования: - изменения тяги ДУ в зависимости от высоты полета, программы выведения, ускорения силы тяжести, силы лобового сопротивления ракеты, методов интегрирования уравнений движения; - модернизации ракеты-носителя.

Стенд предусматривает возможность наращивания аппаратно-программных средств по мере увеличения количества и сложности возлагаемых задач моделирования. В общем виде алгоритм расчета уравнений движения можно представить в виде блок-схемы, показанной на рис.1.

Рис. 1. Блок-схема алгоритма расчета

3. Тестовая задача. Готовность инструмента к проведению процессов исследований и обучения подтверждена решением тестовой задачи. Результаты моделирования сопоставлялись с известными параметрами движения баллистической ракеты (БР) Р-7, полученными в процессе летно-конструкторских испытаний.

Результаты компьютерного математического моделирования по предложенному алгоритму дали хорошее совпадение с результатами лётных испытаний:

- Погрешность в определении высоты в конце активного участка составила 0,08%.
- Погрешность в определении дальности в конце активного участка также 0,08%.
- Погрешность в определении скорости в конце активного участка не превысила 0.12%.

На рис. 2 в качестве примера представлен график скорости центра масс ракеты от времени полёта, который был получен моделированием и подтвержден экспериментальными данными.

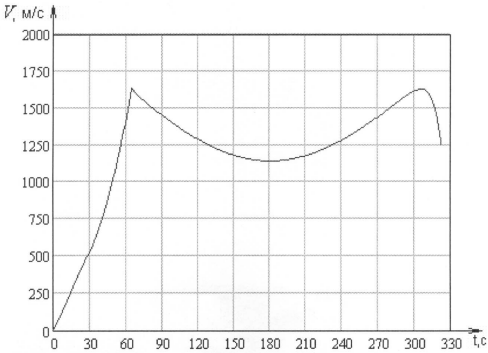


Рис. 3. Изменение $V(t)$ на траектории полета

4. Выводы. Разработаны программно-аппаратные средства интерактивного моделирующего стенда для исследования динамики полета ракеты-носителя при выведении на околоземную орбиту КЛА. Погрешность в определении траекторных параметров не превышает 1%. Результаты, полученные в процессе моделирования с использованием разработанной программы, хорошо совпадают с априорно известными параметрами движения ракеты Р-17, полученными в процессе летно-конструкторских испытаний. Это подтверждает готовность инструмента к проведению исследований и учебного процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

2. Баллистика и навигация ракет: Учебник для втузов/ Дмитриевский А.А. и др. – М., Машиностроение, 1985, -312 с.

УДК 629.783

А.Н. Кузнецов, Р.П. Симоньянц

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СВОБОДНЫХ ВРАЩЕНИЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Предложена методика визуализации движения в частном случае свободного вращения КЛА с учетом диссипации. Используется классический подход Мак-Куллага к геометрической интерпретации уравнений Эйлера-Пуассона.

1. Введение. Пространственные движения космического летательного аппарата (КЛА) относительно центра масс описываются системой нелинейных дифференциальных уравнений, которые в общем случае не имеют аналитических решений. Но даже в частных случаях интегрируемости упрощенных уравнений в форме Эйлера-Пуассона визуализация решений, а следовательно и их качественный анализ, сопряжены со значительными трудностями. Одним из первых геометрическую интерпретацию такого рода движений дал Л. Пуансо (1851 г.), а позже её несколько видоизменил Мак-Куллаг. В неинтегрируемых случаях, когда решения получаем лишь путем численного моделирования, значение наглядной визуализации движений ещё более возрастает [1]. Качественный анализ динамики пространственной ориентации и стабилизации требует её наглядного топологического отображения. Современные компьютерные технологии открывают для этого новые возможности.

В настоящей работе предлагается простая методика визуализации движения связанных с КЛА центральных осей. В качестве концептуальной основы принята геометрическая интерпретация классического решения динамических уравнений Л.Эйлера для интегрируемого случая свободного движения твердого тела, предложенная Мак-Кулагом, изложение которой можно найти в книге [2].

Принимаем допущение, что действием внешних моментов можно пренебречь. Сам КЛА представим твердым телом, несущим в себе элементы конструкции, которые допускают малые перемещения с трением. В такой постановке можно исследовать, например, задачи пассивной стабилизации КЛА вращением.

2. Кинетический момент и энергия. Полагая перемещения элементов масс КЛА малыми, можем с достаточной для практических приложений точностью считать, что тензор инерции остается неиз-

менным. Однако наличие малых перемещений масс и внутреннего трения свидетельствует о диссипации энергии движения.

Известно, что свободное вращение тела вокруг его центра масс имеет характер регулярной прецессии. Сам факт прецессии указывает на то, что для заданной величины вектора кинетического момента $\bar{H}$ кинетическая энергия E избыточна. Она превышает минимально возможную величину $E_{\min}$, соответствующую энергии перманентного вращения вокруг оси максимального момента инерции $J_{\max}$. Прецессия тела, содержащего в себе подвижные массы, сопровождается диссипативными процессами, обеспечивающими сброс избытка энергии $\Delta E = E_0 - E_{\min}$, где E_0 – её начальное значение. Демпфирование прецессии происходит за счет трения при относительных перемещениях подвижных масс. По мере убывания избытка кинетической энергии ΔE уменьшаются амплитуды этих перемещений. Применение специальных демпферов делает этот процесс более интенсивным.

3. Построение кинетических полодий. На интервалах постоянства E движение консервативно. По Эйлеру свободное вращение при отсутствии диссипации описывается векторным дифференциальным уравнением

$$\frac{d\bar{H}}{dt} + \bar{\omega} \times \bar{H} = 0. \qquad (2)$$

Оно имеет два первых интеграла – кинетического момента $\bar{H} = \text{const}$ и кинетической энергии $E = \text{const}$.

Полагаем, что связанные оси являются главными центральными и тензор инерции имеет диагональный вид: $J = \text{diag}(J_x, J_y, J_z)$. Вектором угловой скорости $\bar{\omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ и тензором J определяются вектор кинетического момента $\bar{H} = J \cdot \bar{\omega}$ и соответствующая ему величина кинетической энергии $E = \frac{1}{2} H^2 J^{-1}$. Для определенности будем полагать, что рассматриваемое тело имеет форму асимметричного волчка, а его моменты инерции относительно главных центральных осей распределены так: $J_x > J_y > J_z$, т.е. $J_{\max} = J_x$ и $J_{\min} = J_z$. Первые интегралы выразим через проекции $\bar{H}$ на связанные оси $0xyz$:

$$H_x^2 + H_y^2 + H_z^2 = H^2, \qquad (3)$$

$$H_x^2 J_x^{-1} + H_y^2 J_y^{-1} + H_z^2 J_z^{-1} = 2E. \qquad (4)$$

Суть геометрической интерпретации рассматриваемого движения по Мак-Куллагу в следующем. Уравнению интеграла энергии (4) в

пространстве переменных H_x, H_y, H_z соответствует эллипсоид, называемый эллипсоидом Мак-Куллага, по форме взаимный эллипсоиду инерции. Следовательно, его оси совпадают со связанными осями рассматриваемого тела и вместе с ними движутся в неподвижном пространстве. Поверхность эллипсоида (4) определяется заданной величиной кинетической энергии. Уравнению (3) в тех же переменных отвечает сфера, радиус которой определяется заданной величиной кинетического момента. Пересечение поверхностей (4) и (3) дает две замкнутые пространственные кривые четвертого порядка – «кинетические полодии». Поскольку вектор кинетического момента в рассматриваемом случае неизменен в инерциальном пространстве, его конец вычерчивает на движущейся поверхности эллипсоида кинетическую полодию. На противоположной поверхности эллипсоида симметрично расположена вторая кинетическая полодия. Её вычерчивает прямая линия, совпадающая с направлением вектора кинетического момента.

Таким образом, в геометрической интерпретации Мак-Кулага свободное движение тела вокруг центра масс наглядно представлено движением эллипсоида (4). В процессе движения неподвижный вектор кинетического момента вычерчивает на поверхности эллипсоида замкнутую пространственную кривую, являющуюся образом периодического движения. Эту интерпретацию использовал К. Магнус в монографии [2] при описании движения гироскопа. Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшиц [4] без ссылок на автора применили подход Мак-Кулага при описании движения асимметричного волчка. В этом описании был сделан следующий шаг: построены семейства кривых для дискретного множества возможных значений кинетического момента при неизменной величине кинетической энергии. Такие построения дают косвенное представление о характере движений. Однако, они искусственны и не вполне отражают сути протекающих процессов.

Поскольку неизменным в рассматриваемом движении остается не энергия, а кинетический момент $\bar{H}$, целесообразно рассматривать движение не эллипсоида Мак-Кулага, а движение кинетической сферы вместе со связанными осями координат. Тем более, что кинетические полодии принадлежат в равной мере, как эллипсоиду, так и сфере. Для построения множества кривых на сфере следует задать дискретное множество значений кинетической энергии $E_i = \text{const}$, отвечающих заданной величине $\bar{H}$.

4. Визуализация в диссипативном случае. В общем случае величина ΔE изменяется примерно по экспоненциальному закону [3], асимптотически приближаясь к нулю:

$$\begin{cases} E = E_{\min} + \Delta E \cdot \exp(-\alpha t), \quad \Delta E = E_0 - E_{\min}, \quad E_0 \in [E_{\max}, E_{\min}], \\ E_{\max} = \frac{1}{2} H^2 J_{\min}^{-1}, \quad E_{\min} = \frac{1}{2} H^2 J_{\max}^{-1}, \end{cases}$$

где α – коэффициент, характеризующий интенсивность демпфирования. Его значение задаем на основе экспериментальных данных.

Весь период T рассматриваемого движения разбиваем на равные интервалы времени $\Delta t = t_i - t_{i-1}$, $i = \overline{1,n}$. Полагая, что на каждом из них движение протекает консервативно, с постоянной энергией $E_i = E(t_i)$, строим *n* замкнутых кривых, представляющих собой пересечения кинетической сферы $\bar{H} = \text{const}$ с соответствующим эллипсоидом Мак-Кулага. Шаг Δt выбираем исходя из длительности рассматриваемого движения $T \geq 3\alpha^{-1}$, и требуемой плотности семейства кривых.

Полученное таким образом семейство пространственных кривых приближенно отражает прецессионное движение с диссипацией энергии. Последовательность кривых отвечает выбранным интервалам и косвенно обеспечивает привязку ко времени движения. А их геометрические размеры соответствуют угловым параметрам прецессии.

На рис.1 дана геометрическая картина семейств кинетических полодий. Они располагаются вокруг осей *Ox* и *Oz*, зеркально отображаясь друг в друга. Всего на поверхности сферы размещается две пары семейств. Разделяют их сепаратрисы – плоские траектории (две окружности), проходящие через полюсы. Близлежащие полодии отображают двоякоасимптотические движения. Четыре полюса соответствуют перманентным вращениям вокруг главных центральных осей инерции. Как следует из представленной картины, вращение вокруг оси среднего момента инерции неустойчиво.

Для построений на кинетической сфере возможно использование безразмерных переменных:

$$H_x H^{-1} = x, \; H_y H^{-1} = y, \; H_z H^{-1} = z,$$

$$J_x J_{\max} = a, \; J_y J_{\max} = b, \; J_z J_{\max} = c,$$

$$h_i = E E_{\max}^{-1}, \quad h_{\max} = E_{\max} E_{\min}^{-1} = J_{\max} J_{\min}^{-1} > h_i > 1$$

Тогда уравнения (3) и (4) принимают вид:

$$x^2 + y^2 + z^2 = 1,$$

$$x^2 a^{-1} + y^2 b^{-1} + z^2 c^{-1} = h_i.$$

В проекциях на плоскости системы координатных осей $0xyz$ кинетическая сфера с семействами пространственных кривых четвертого порядка даёт соответствующие семейства плоских кривых второго порядка.

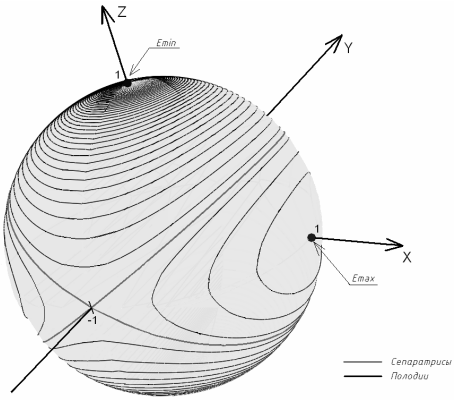


Рис. 1. Кинетическая сфера

5. Выводы. Предложена визуализация вращения КЛА как твердого тела с внутренним трением, основанная на геометрической интерпретации пространственного движения центральных связанных осей на поверхности кинетической сферы. Рассмотрен упрощенный пример, в котором движения представлены конечным множеством траекторий. Каждая из траекторий отражает дискретно консервативное движение, допускающее применение классической модели Эйлера. Концепция методики с определёнными доработками может быть применена и для более сложных моделей. Рассмотренные построения позволяют локально исследовать сложные динамические процессы стабилизации КЛА, давая им простую и наглядную геометрическую интерпретацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов А.В., Мамаев И.С. Динамика твердого тела. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001, 384 с.
2. Магнус К. Гироскоп. Теория и применение. –М: Мир, 1974, 516 с.
3. Рейтор Г.С. и Томсон У.Т. Вращательные движения пассивных космических аппаратов. В кн. «Механика космического полета». - М.: Наука, 1966.
4. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Механика. – М.: Наука, 1966, 203 с.

УДК 629.1

А.С. Новосёлов, И.Н. Телегин

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТРАЕКТОРИИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПОСЛЕ СТОЛКНОВЕНИЯ

Силами студентов МГТУ им. Н.Э.Баумана (факультет ПС) разработано устройство автоматической регистрации дорожно-транспортных происшествий. Приводится описание прибора и его характеристики.

Введение. Анализ причин автодорожного происшествия средствами, имеющимися у служб ГИБДД – ГАИ, является сложным и длительным процессом, основанным на измерениях тормозного пути, на оценке расположения автомобилей на месте аварии и состояния их после аварии, дающих косвенную информацию о направлении движения, скорости и силы удара при столкновении. При этом возникают недопустимые задержки движения других транспортных средств. В связи с этим возникла необходимость создания принципиально новых методов в оценке дорожно-транспортных происшествий (ДТП).

По данным печати, в США, уже с 1996 года на некоторых моделях автомобилей фирмы «Дженерал Моторс» (США) устанавливаются регистраторы дорожных происшествий (РДП), функцией которых является запись причин срабатывания подушек безопасности в автомобиле. С 1999 года «Дженерал Моторс» устанавливает подобные устройства на все автомобили, выпускаемые на ее заводах. Сходная, более продвинутая версия РДП, испытывается в настоящее время фирмой «Форд» в полицейских автомобилях США. Эта модель РДП автоматически посылает сообщение об аварии диспетчерам по телефону скорой помощи 911.

РДП, применяемые в США, используют информацию, получаемую непосредственно с датчиков, встроенных в процессе изготовления в автомобильные узлы. Такой принцип построения РДП затрудняет использование или создание аналогичных систем в России. У нас в стране крайне мало автомобилей, содержащих специально встроенные для этих целей датчики. Наиболее рациональное решение в данной ситуации – создание устройства, которое уже содержит все необходимые датчики [1].

Создание экспериментального образца такого устройства – регистратора дорожных происшествий – было начато на предприятии «ФГУП МЗЭМА» в сентябре 2006 года группой студентов МГТУ им

Баумана из четырёх человек (Ковтанюк А., Новосёлов А., Телегин И., Шамаев Г.). Первые испытания функционирующего прибора – в 2007.

2. Экспериментальный образец. Основные характеристики РДП: Точность восстановления траектории при анализируемом интервале 10 с – 3 *м*, 20 *с* – 12 *м*. Точность определения скорости движения: с использованием РДП 0,1 м/с, без использования РДП 1,5 *м/с*. Точность определения ускорения торможения и ударной перегрузки 0,5%. Напряжение питания 9 – 14,4 *В*. Потребляемая мощность не более 6 *Вт*. Время автономной работы 2 часа. Стандарт передачи данных IEEE.802.15.4. Дальность передачи данных 30-60 *м*. Габаритные размеры опытного образца 140x100x100 *мм*. Масса опытного образца 1,2 *кг*. Схема функционирования представлена на рис. 1.

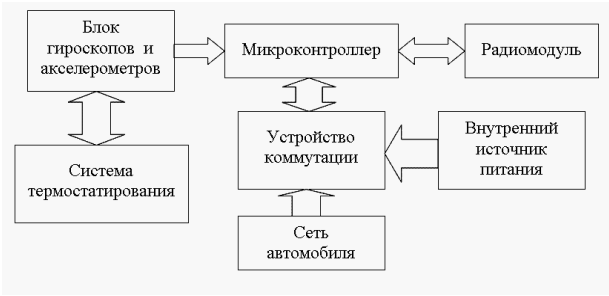


Рис. 1. Схема функционирования

В состав прибора входят: блок чувствительных элементов, GPS приёмник, микроконтроллер для обработки информации и радиочастотный модуль приёма-передачи, реализована система термостатирования для блока чувствительных элементов, аккумуляторная батарея.

Вся информация о перемещении объекта снимается с блока чувствительных элементов, обрабатывается контроллером и передаётся через радиомодуль. Блок чувствительных элементов состоит из датчиков угловой скорости (ДУС) и акселерометров, они смонтированы на термостатируемом кубе, вокруг которого расположены электрические платы. Такое расположение способствует равномерному прогреву системы и позволяет существенно снизить ошибки, связанные с температурным дрейфом, повысить точность прибора.

В устройстве применены датчики угловой скорости ADXRS300 фирмы Analog Devices. Это микромеханические одноосные датчики вращения, которые имеют низкое энергопотребление, малые габариты. Они используются для решения задачи навигации в небольшом промежутке времени. Для ориентации в пространстве используются 3 ги-

роскопа, оси чувствительности которых взаимно перпендикулярны. В качестве датчиков ускорения применены также микромеханические акселерометры фирмы Analog Devices: один одноосный акселерометр ADXL103 и двухосный ADXL203 с диапазоном измерений +/–1,7 g, и двухосный ADXL321 диапазоном измерений +/– 18g для измерения ускорений при ударе. Ось чувствительности акселерометра ADXL103 перпендикулярна плоскости, в которой расположены оси чувствительности двух других датчиков ускорения. Предполагается, что по этой оси больших ускорений возникать не будет, поскольку она всегда перпендикулярна плоскости, в которой происходит основное перемещение ТС.

Модулем для снятия и хранения данных является микроконтроллер, который имеет 8 линий 12-ти разрядного АЦП, которые используются для оцифровки данных с гироскопов и акселерометров. МК имеет 48 *Кбайт* Flash памяти и 10 *Кбайт* ОЗУ, что позволяет сохранить информацию с датчиков до и после удара. Также имеется встроенный модуль UART, позволяющий ему обмениваться данными с Zig-Bee модулем.

3. Принцип действия системы. После включения микроконтроллер непрерывно снимает показания с датчиков, производит накопление и осреднение, а также вносит поправки, после чего записывает их в ОЗУ таким образом, что в ОЗУ постоянно хранится информация о последних 10 секундах движения. При ударе величина вектора ускорения увеличится, программа реагирует на это, и последующие данные будут записываться во flash. Через 10 секунд после удара запись остановится, и информация из ОЗУ будет переписана в энергонезависимую память. После этого информация может быть передана через радиомодуль по запросу системы автоматизированной системы обработки данных (АСОД). Во время передачи оба модуля будут находиться в режиме точка – точка. Кроме того, контроллер имеет возможность отслеживать напряжения бортовой сети и при его отсутствии перейти на питание от внутреннего аккумулятора, переведя всю систему в режим пониженного энергопотребления, отключив чувствительные элементы.

При поступлении запроса модуль начинает передавать пакеты данных из flash. Каждый пакет содержит 3 величины ускорения по 4 байта каждая и 3 величины угловой скорости по 4 байта, номер пакета в качестве заголовка 2 байта и контрольную сумму, которая определяется двумя младшими байтами суммы всех байтов. Кадры, хранящиеся в памяти, сняты с частотой 30 Гц. Таким образом, весь необходимый объём информации будет передан менее чем за 3 секунды.

Для передачи информации применён радиомодуль стандарта Zig-Bee, X-Bee фирмы MaxStream, обеспечивающий обмен данными в диапазоне 2,4 *ГГц*, на расстоянии до 100 *м*. В дальнейшем планируется увеличить дальность до 1000 *м*. В экспериментальном образце радиомодуль X-Bee был перепрограммирован на работу в режиме точка – точка. Работая в этом режиме, передатчик будет передавать информацию только какому-то одному модулю. В нашем случае единственным адресатом является система АСОД. Во время обмена радиомодуль поддерживает скорость порядка 100 *Кбит/сек*. Основная часть системы с контроллером и чувствительными элементами находится в экранирующем корпусе. Для радиомодуля сделан специальный отсек из текстолита, который хорошо пропускает радиоволны. Модули шлейфами соединены с платой коммутации.

Чтобы обеспечить работу устройства при его отключении от бортовой сети в результате аварии, в приборе установлен аккумулятор типа «Крона». Аккумулятор подзаряжается от бортовой сети автомобиля, а при потере внешнего питания мгновенно начинает отдавать энергию. Вся информация с датчиков сохраняется в энергонезависимой памяти. Система переходит в режим пониженного энергопотребления: отключаются гироскопы и термостабилизация; радиомодуль включается несколько раз в секунду, контролируя запрос на передачу.

Система помещена в прочный хорошо защищённый корпус, предохраняющий её от внешнего воздействия. Кроме того, корпус теплоизолирован, что снижает энергозатраты на термостатирование. Применение чип элементов позволило уменьшить габариты и повысить стойкость системы к перегрузкам.

4. Автоматизированная система обработки данных (АСОД) – считывающее и анализирующее устройство – предназначено для обработки сотрудником ГИБДД данных РДП на месте ДТП. АСОД содержит: Переносный компьютер. Радиомодуль ZigBee, предназначенный для приема данных РДП. Мобильный принтер с автономным источником питания. Программное обеспечение, разработанное в среде Borland C++ builder, функцией которого является прием и обработка данных РДП.

При разборе причин ДТП, сотрудник ГИБДД, получает при помощи АСОД информацию от всех РДП, установленных на автомобилях участвующих в ДТП. На дисплее портативного компьютера он может отобразить траектории движения всех транспортных средств за 10 *с* до столкновения и 10 *с* после столкновения. Это позволяет восстановить особенности движения каждого автомобиля перед ДТП (направление движения, его линейную скорость и угловые скорости), а

также силу и направление удара в момент столкновения, развороты после столкновения и т.п.

Программное математическое обеспечение осуществляет автоматическое сканирование регистрационных номеров всех участников ДТП и автомобилей-свидетелей, находящихся в зоне действия радиоканала. При выборе номера автомобиля в меню, ПМО производит считывание с его РДП полного пакета данных, состоящего из заголовка (Стартовая дата и время и служебная информация) и данных полученных с инерциальных чувствительных элементов с частотой дискретизации 30 *Гц*. При возникновении ошибки передачи данных запрос на РДП повторяется через 2 *с*.

Для обработки данных реализуется алгоритм интегрированной бесплатформенной инерциальной навигационной системы (ИНС). Для получения данных РДП отправляется запрос на РДП выбранного автомобиля. После получения каждой выборки, состоящей из данных ИНС, показаний GPS и прочей служебной информации, проверяется контрольная сумма. В случае положительного результата отправляется запрос на получение следующей выборки, в противном случае повторяется прием текущей выборки.

5. Ориентация. Определение начального значения кватерниона (выставка) производится после полной остановки автомобиля. Проверяются все выборки, полученные с РДП, при выполнении условия: $9.8 \le \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2} \le 9.81$, где A_x, A_y, A_z – показания акселерометров. Все последующие выборки считаются полученными после остановки. Находится средние значения компонент $A_{xcp.}$, $A_{ycp.}$, $A_{zcp.}$ и значение ускорения в месте остановки: $g = \sqrt{(A_{Xcc.})^2 + (A_{Ycc.})^2 + (A_{Zcc.})^2}$. Ориентация автомобиля в конечном положении определяется углом тангажа $\Phi_{X0} = \arcsin A_{Y.CP} g^{-1}$ и углом крена $\Phi_{Y0} = \arcsin A_{X.CP} g^{-1}$. Угол курса Φ_{Z0} задается пользователем, также как и начальные перемещения S_x, S_y. Соответствующий кватернион $Q = q_0 + q_1 \cdot i + q_2 \cdot j + q_3 k$ задается в виде массива из 4 элементов, начальное значение которых рассчитываются так [2]:

$$q[0] = \cos \tfrac{1}{2}\Phi_0, \quad q[1] = \Phi_{X0}\Phi_0^{-1} \sin \tfrac{1}{2}\Phi,$$

$$q[2] = \Phi_{Y0}\Phi_0^{-1} \sin \tfrac{1}{2}\Phi, q[3] = \Phi_{Z0}\Phi_0^{-1} \sin \tfrac{1}{2}\Phi,$$

где $\Phi_0 = \sqrt{\Phi_{X0}{}^2 + \Phi_{Y0}{}^2 + \Phi_{Z0}{}^2}$.

6. Вычисление траектории. Поскольку автомобиль в конце пути покоится, проекции его скорости на оси местной географической системы координат равны нулю. Интегрирование производится методом трапеций. Рассчитываются приращения углов:

$$\Delta\Phi=\sqrt{\sum_i \Phi_i^2},\quad \Delta\Phi_i=0{,}5\cdot T\cdot(G_{i,N}+G_{i,N-1}),\quad i=X,Y,Z,$$

где T – период дискретизации выборок, G_x, G_y, G_z – показания ДУС'ов. Затем рассчитываются приращения элементов кватерниона:

$$\Delta\lambda[0]=\cos\tfrac{1}{2}\Delta,\ \Delta\lambda[1]=\Delta\Phi_X\Delta\Phi^{-1}\cdot\sin\tfrac{1}{2}\Delta\Phi,$$

$$\Delta\lambda[2]=\Delta\Phi_Y\Delta\Phi^{-1}\cdot\sin\tfrac{1}{2}\Delta\Phi,\ \Delta\lambda[3]=\Delta\Phi_Z\Delta\Phi^{-1}\cdot\sin\tfrac{1}{2}\Delta\Phi$$

Вычисляются значения элементов кватерниона по приращениям:

$$\begin{pmatrix} q[0]\\ q[1]\\ q[2]\\ q[3]\end{pmatrix}_N=\begin{pmatrix} \Delta\lambda[0] & -\Delta\lambda[1] & -\Delta\lambda[2] & -\Delta\lambda[3]\\ \Delta\lambda[1] & \Delta\lambda[0] & \Delta\lambda[3] & -\Delta\lambda[2]\\ \Delta\lambda[2] & -\Delta\lambda[3] & \Delta\lambda[0] & \Delta\lambda[1]\\ \Delta\lambda[3] & \Delta\lambda[2] & -\Delta\lambda[1] & \Delta\lambda[0]\end{pmatrix}\times\begin{pmatrix} q[0]\\ q[1]\\ q[2]\\ q[3]\end{pmatrix}_{N-1}.$$

Выполняется нормализация кватерниона

$$\Delta=1-(q[0]^2+q[1]^2+q[2]^2+q[3]^2)\cdot$$

Производится расчет матрицы направляющих косинусов:

$$C=\begin{pmatrix} (q[0]^2+q[1]^2-q[2]^2-q[3]^2) & 2\cdot(q[1]\cdot q[2]-q[3]\cdot q[0]) & 2\cdot(q[1]\cdot q[3]+q[0]\cdot q[2])\\ 2\cdot(q[1]\cdot q[2]+q[0]\cdot q[3]) & (q[0]^2-q[1]^2+q[2]^2-q[3]^2) & 2\cdot(q[2]\cdot q[3]+q[0]\cdot q[1])\\ 2\cdot(q[1]\cdot q[3]-q[0]\cdot q[2]) & 2\cdot(q[2]\cdot q[3]-q[0]\cdot q[1]) & (q[0]^2-q[1]^2-q[2]^2+q[3]^2)\end{pmatrix}$$

Переход из связанной системы координат в инерциальную осуществляется умножением матрицы направляющих косинусов на вектор ускорения

$$\begin{pmatrix} a_X{}^{II}\\ a_Y{}^{II}\\ a_Z{}^{II}\end{pmatrix}=C\cdot\begin{pmatrix} a_X\\ a_Y\\ a_Z\end{pmatrix},$$

где $a_x a_y a_z$ – значения проекций ускорений, измеренные акселерометрами. Величины проекций скорости автомобиля в инерциальной системе координат находятся интегрированием методом трапеций:

$$V_{XN}=0.5\cdot T\cdot(a_{XN}{}^{II}+a_{XN-1}{}^{II})$$

$$V_{YN}=0.5\cdot T\cdot(a_{YN}{}^{II}+a_{YN-1}{}^{II})$$

Координаты автомобиля в инерциальной системе координат в каждый момент времени определяются по формулам:

$$S_{XN} = 0.5 \cdot T \cdot (V_{XN} + V_{XN-1})$$
$$S_{YN} = 0.5 \cdot T \cdot (V_{YN} + V_{YN-1})$$

По найденным таким образом данным производится построение диаграммы траекторий движения участников ДТП. На диаграмме также отображаются скорости движения автомобилей.

7. Выводы. Студентами МГТУ им. Н.Э. Баумана разработано и подготовлено к испытаниям устройство регистрации дорожных происшествий. Дальнейшее совершенствование РДП и АСОД позволит опрашивать движущийся автомобиль, получая сведения: о его номере, марке, владельце, техническом осмотре, скорости передвижения наличии незарегистрированных ДТП. Приёмник GPS сможет передавать сведения о местоположении, времени и скорости в бортовую сеть автомобиля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Регистратор дорожных происшествий, www.memsconus.com, 29.11.2006.
2. Ишлинский А.И., Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация. – М.: Наука, 1976, 672 с.

УДК 629.7

М.В. Палкин

УПРАВЛЕНИЕ УГЛОВЫМ ПОЛОЖЕНИЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В настоящее время актуальна задача разработки новых принципов получения информации для управления летательным аппаратом, позволяющих упростить и удешевить систему управления. Характерным примером является создание управляемых реактивных снарядов (УРС), построенных на базе неуправляемого реактивного снаряда, дополненного специализированным носовым блоком – управляющим модулем дооснащения (УМД), рис.1 [1]. Снаряженные полезной нагрузкой УРС могут использоваться для дистанционного тушения горящих нефтяных скважин, лесных пожаров; для доставки полезных грузов в труднодоступные участки местности; точечного инициирования схода снежных лавин и выполнения других задач.

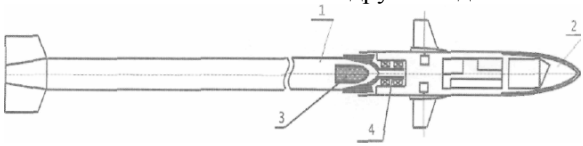


Рис. 1. Конструктивно-компоновочная схема УРС: 1-серийный неуправляемый РС; 2 - УМД; 3 - полезная нагрузка; 4 –цилиндрический шарнир.

УМД оснащается головкой самонаведения (ГСН) с матричным приемником оптического излучения планово-перспективного визирования, жестко соединенным с корпусом УМД, бортовым вычислительным комплексом (БВК), аэродинамическими органами управления УРС. Между собой реактивный снаряд и УМД соединены с помощью цилиндрического шарнира, ось вращения которого совпадает с продольной осью снаряда. Такое соединение позволяет «развязать» по каналу крена УМД и вращающийся относительно продольной оси снаряд и осуществлять стабилизацию угла крена УМД для устойчивого визирования ГСН области расположения цели при самонаведении.

В качестве датчика крена системы стабилизации используется штатная ГСН. Построенная таким образом система работает в режиме ориентации, предназначенном для ликвидации начальных угловой скорости и угла крена УМД после «закрутки» УМД по крену при старте УРС, и режиме стабилизации достигнутого при ориентации значения угла крена УМД. В БВК на основе получаемого от ГСН изображе-

ния определяются параметры крена УМД и формируются управляющие команды для стабилизации УМД по крену.

Алгоритм ориентации УМД по крену построен на основе разностно-яркостного метода, производящего поиск областей неба и земли на основе различия их яркостных характеристик, с применением методов гистограммного и морфологического анализа изображения [2]. Использование в качестве ориентиров для алгоритма ориентации изображения неба и земли характеризуется информационной достаточностью и инвариантностью к изменению масштаба изображения.

Алгоритм стабилизации УМД построен на основе итерационного процесса определения угла крена УМД путем определения взаимного смещения ориентиров поверхности земли на текущем кадре и на эталонном кадре, полученном в момент предполагаемого отсутствия крена УМД [3].

Система стабилизации является типовой статической системой стабилизации угла крена с ПД-законом управления, позволяющим обеспечить требуемые статические и динамические характеристики системы. Выполнены комплексные исследования системы стабилизации методом математического моделирования. Результаты показали, что для ряда траекторий возможен выбор постоянных параметров корректирующего устройства. При этом обеспечиваются требуемые показатели качества системы: точность стабилизации по углу крена УМД $\varepsilon \le 4,5$ град; время переходных процессов $t_p \le 0,2$ с. Показано, что для траекторий с углами пуска > 40° параметры необходимо менять в соответствии с циклограммой полета.

Реализация предложенного способа стабилизации УМД по крену позволяет уменьшить стоимость и минимизировать состав бортового оборудования УРС, упразднив гироскопические измерители угла и угловой скорости по крену.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент №2164657. Управляемый реактивный снаряд / Ефремов Г.А., Бурганский А.И., Хомяков М.А., Лавренов А.Н., Большаков М.В.// Российское агентство по патентам и товарным знакам. - 1999 г.
2. Баклицкий В.К., Бочкарев А.М., Мусьяков М.П. Методы фильтрации сигналов в корреляционно-экстремальных системах навигации. - М.: «Радио и связь», 1986. - 216 с.
3. Патент №2280590. Способ ориентирования по крену летательного аппарата с оптической головкой самонаведения / Большаков М.В., Лавренов А.Н., Кулаков А.В., Палкин М.В.// Федеральный институт патентной собственности. - 2006 г.

КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 681.3

В.В. Савельев, В.И. Мартынов, И.А. Иванов

ГИБРИДНЫЙ МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В данной работе впервые поставлена и решена задача совместной обработки многоспектральных изображений с целью распознавания объектов. Предложенное решение является мощным ресурсом повышения надежности их обнаружения (селекции), особенно в условиях сложной погодной и/или наземной фоно-целевой обстановки.

1. Введение. Развитие специальных видов техники и расширение круга задач, решаемых автономными системами управления полетом ЛА, привели к необходимости создания систем, в которых для периодического уточнения траектории полета системой управления (СУ) используются дополнительные измерения, основанные на оптимальных методах распознавания фрагментов наблюдаемой в полете местности (или расположенных на ней объектов).

В работе впервые поставлена и решена задача совместной обработки многоспектральных изображений с целью распознавания объектов. Это решение является мощным ресурсом повышения надежности их обнаружения (селекции), особенно в условиях сложной погодной и/или наземной фоно-целевой обстановки. Гибридный зонно-яркостный метод распознавания объектов на многоспектральных изображениях является принципиально новым шагом в данном направлении исследований.

До настоящего времени подобные разработки полностью отсутствовали:

- либо применялись только зонные алгоритмы при работе *по наземным ориентирам*, для которых свойственна нестабильность яркостных контрастов,
- либо поэлементно-яркостные для сопровождения *изолированных ярких* целей (самолеты, корабли) с известным знаком контраста.

Причина – работа большинства существующих систем распознавания только по одному каналу с ориентацией, как правило, на цели только определенного типа. И даже в системах с двумя спектральными

каналами распознавание парциальных изображений производится независимо – без автоматической совместной обработки – по определенным приоритетным правилам, причем с участием оператора.

Ни то, ни другое *в отдельности* недостаточно для обеспечения надежной работы многоспектральной системы распознавания (МССР) наземных объектов в условиях «на грани» их наблюдаемости.

2. Наблюдаемость объектов на изображениях. Как известно, наблюдаемость наземных объектов связана с природной изменчивостью их характеристик отражения (ХО) под воздействием сезонных и погодных факторов, которая проявляется как колебания знака и величины (оптического, ИК или радиолокационного) контраста между соседними объектами изображения [1]. Это свойство изменчивости природного контраста, как показали исследования, присуще изображениям местности (и расположенным на ней объектам), получаемым в самых разных спектральных диапазонах, и обусловлено физическими факторами, определяющими условия съемки. Так, например, для РЛ изображений такими факторами являются шероховатость поверхности и неоднородность ее диэлектрической проницаемости, для оптических – переменный естественный ракурс освещения, для тепловых – неодинаковая скорость нагрева и остывания соседних на местности покровов (например, растительности). Заметим, что вследствие указанных для них факторов – характерна даже суточная изменчивость контрастов (рис.1).

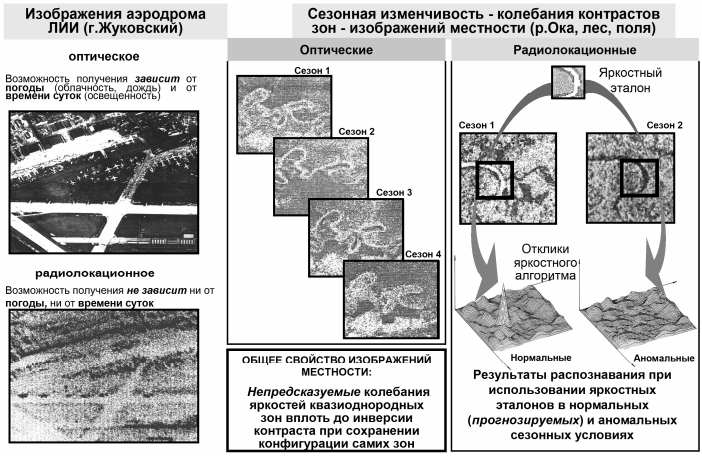


Рис. 1. Сезонная изменчивость изображений местности

Отсюда вытекает необходимость решения задачи оптимального – с точки зрения стратегии применения СН – учета этой изменчивости методами подготовки полетного задания и/или бортовой обработки принимаемого сигнала.

Известные поэлементные алгоритмы распознавания изображений корреляционного типа, основанные на методе максимума правдоподобия (МП), устойчиво работают только в условиях коррелированных сезонных шумов наблюдения, когда сохраняются не только знак, но и, до определенной степени, величина контраста наблюдаемых объектов местности [2]. Однако это условие коррелированности сезонных шумов, как показали исследования, выполняется крайне редко, особенно для равнинных участков местности.

Таким образом, существование природной изменчивости контрастов практически исключает возможность применения традиционных методов и алгоритмов корреляционной обработки, что было достоверно установлено на статистически большой выборке при самолетных и натурных испытаниях (более 3000 визирований) отечественной системы маршрутной навигации изд.3М25, созданной НПО машиностроения еще в 70-80-х годах.

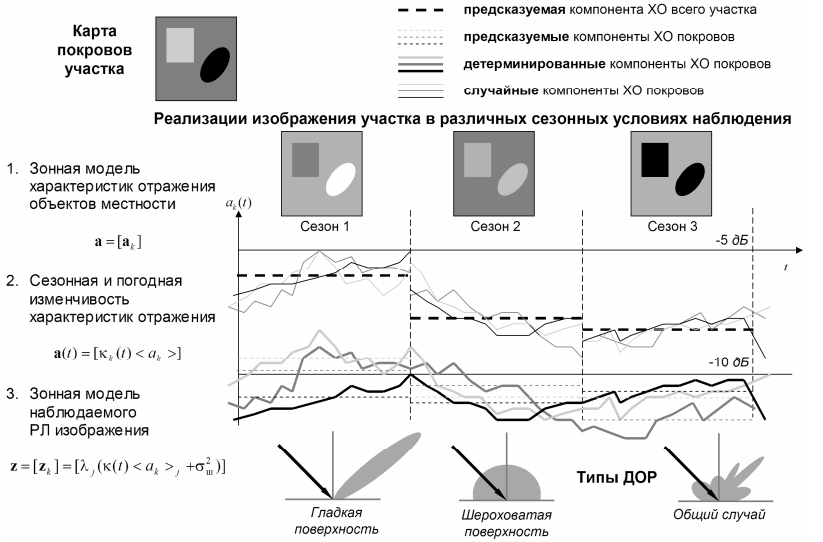


Рис. 2. Зонная модель сезонной изменчивости характеристик отражения объектов

Проблему сезонной изменчивости можно решить с использованием зонной модели изображения, основанной на том, что земная поверхность состоит из протяженных областей, в пределах каждой из которых отражающие свойства приблизительно постоянны – так называемых однородных зон (рис. 2). Структурно-зонные алгоритмы, основанные на этой модели, эффективно решают проблему распознавания объектов с нестабильными ХО, однако не позволяют производить совместную обработку изображений, полученных в различных спектральных диапазонах.

Разработанный метод полностью автоматической совместной обработки изображений многоспектральной системы, названный гибридным, логично сочетает адаптивные свойства ранее апробированных структурно-зонных и поэлементно-яркостных алгоритмов распознавания, доставляя решение задачи согласно принципу максимума правдоподобия. Гибридный метод опирается на ранее накопленный опыт разработки систем распознавания изображений разной физической природы, который показал, что алгоритмическое решение задач обнаружения объектов на многоспектральных снимках ДЗЗ может быть реализовано в рамках единого подхода.

Этот подход основан на базовых принципах решения задачи распознавания образов, решение которой в общем виде может быть организовано в виде совместной обработки «разноканальной» информации по так называемому критерию среднего риска.

3. Общий подход. Как известно, условный средний риск, соответствующий принятию решения в пользу фрагмента наблюдаемого изображения (НИ) $\mathrm{z}(\tau_i)$ при выбранном эталоне **a**, равен

$$\mathrm{R}\left\{\tau_i \mid \mathrm{z}(\tau_i, \mathrm{a})\right\} = \sum_j \frac{1}{\mathrm{p}(\mathrm{z}_j)} \mathrm{p}\left\{\mathrm{z}(\tau_j, \mathrm{a}) \mid \tau_j\right\} \mathrm{p}(\tau_j)\ \mathrm{C}(\tau_i \mid \tau_j), \quad (1)$$

где: $\mathrm{p}\left\{\mathrm{z}(\tau_j, \mathrm{a}) \mid \tau_j\right\}\mathrm{p}(\tau_j)$ – условная вероятность наблюдения отсчетов z_j при использовании фиксированного эталона **a** в j-м фрагменте НИ; $\mathrm{p}(\mathbf{z}_j)$ – безусловная вероятность наблюдения данной реализации фрагмента $\mathbf{z}_j$; $\mathrm{C}(\tau_i \mid \tau_j)$ – функция потерь, определяющая относительные потери, связанные с принятием ошибочного решения в пользу гипотезы *i,* когда на самом деле справедлива гипотеза *j*.

Вид функции потерь определяется принятым критерием качества и должен выбираться, исходя из конечной цели распознавания. Оптимальный алгоритм (1) должен для каждой проверяемой гипотезы

формировать условный риск и принимать решение в пользу той гипотезы, для которой это выражение достигает минимума [3].

Обычно используемая в задачах наведения (и простейшая) функция потерь соответствует случаю, когда благоприятными исходами считаются только точные распознавания: $\mathrm{C}(i \mid j) = 1 - \delta_{ij}$.

Применительно к задаче навигации ЛА это означает, что совмещение наблюдаемого изображения (НИ) с эталонным необходимо производить точно. Ошибки даже в один дискрет недопустимы. Именно такая ситуация имеет место в тех случаях, когда решаемая ЛА задача требует выполнения привязки изображений с точностью не хуже, а даже лучше размеров дискрета. В этом случае

$$\mathrm{R}\{\mathbf{a}(\tau_i) \mid \mathbf{z}\} = 1 - \mathrm{p}\{\mathbf{z} \mid \mathbf{a}(\tau_i)\}\mathrm{p}(\tau_i)\ , \qquad (2)$$

откуда вытекает алгоритм максимума апостериорной вероятности

$$\mathrm{p}\{\mathbf{z} \mid \mathbf{a}(\tau_i)\}\,\mathrm{p}(\tau_i)\ \Rightarrow\ \mathrm{Max}. \qquad (3)$$

Если $\mathrm{p}(\tau_i) = const$ (все гипотезы считаются равновероятными), мы получаем алгоритм максимума правдоподобия

$$\mathrm{p}\{\mathbf{z} \mid \mathbf{a}(\tau_i)\} \Rightarrow \mathrm{Max} \qquad (4)$$

который является базовым для построения бортовых алгоритмов распознавания в современных системах навигации ЛА по изображениям объектов.

Далее, в предположении, что искажения во всех элементах НИ независимы, эта плотность $\mathrm{p}(\mathbf{z} \mid \mathbf{a})$ распадается на произведение n плотностей $\mathrm{p}(z_j \mid a_j)$ отдельных элементов, и мы получаем так называемый поэлементный классификатор МП с решающей функцией (РФ) в виде суммы

$$\Phi\{\mathbf{z} \mid \mathbf{a}_i\} = -\ln \mathrm{P}(\mathbf{z} \mid \mathbf{a}_i) = -\ln \prod_{j=1}^{n} \mathrm{p}(z_j \mid a_{ij}) = -\sum_{j=1}^{n} \ln \mathrm{p}(z_j \mid a_{ij}),$$

где i - номер гипотезы; j - номер элемента в пределах гипотезы.

4. Совместная обработка разноканальной информации. При наличии в МССР 2-х каналов (например, оптика и ИК) рассмотренный подход должен быть модифицирован в соответствии с тем, что наблюдаемое изображение – так же как и эталонное - приобретает блочную структуру, а именно:

$$\mathbf{z} = \mathbf{z}_{тв} \cdot \left(\mathbf{z}_{тпв}\right)^{-1} \qquad (5)$$

В результате аналогичных преобразований мы точно так же приходим к необходимости формирования общей функции правдоподобия в виде суммы парциальных функций правдоподобия:

$$\Phi\{\mathbf{z} \mid \mathbf{a}_i\} = -\ln\ \mathrm{P}(\mathbf{z} \mid \mathbf{a}_i) = -\left\{\ln\ \mathrm{P}(\mathbf{z}_{тв} \mid \mathbf{a}_i^{тв}) + \ln\ \mathrm{P}(\mathbf{z}_{тпв} \mid \mathbf{a}_i^{тпв})\right\} \qquad (6)$$

Для реализации такого многоканального алгоритма максимума правдоподобия требуется произвести адекватное взаимное амплитудное масштабирование массивов функций правдоподобия разных сенсоров с целью их совместного анализа.

Эта задача, ввиду различия в физической природе изображений разных сенсоров, тривиальной не является. Более того, даже незначительные, на первый взгляд, неточности в построении математической модели взаимного масштабирования могут привести к полному «развалу» процедуры совместной обработки в части оценки «похожести» парциальных (разноканальных) функций правдоподобия.

Рис. 3. Совместная обработка изображений отдельных сенсоров МССР

Но если объект наблюдается хотя бы в одном из каналов МССР, это дает всплеск функции правдоподобия в соответствующем спектре, который регистрируется независимо от уровня РФ в остальных каналах, в чем, собственно, и заключается идея гибридного метода (рис. 3).

Предложенное комбинированное использование зонных алгоритмов с поэлементно-яркостными алгоритмами позволяет после построения парциальных функций правдоподобия строить суммарную – по всем спектрам МССР – решающую функцию в виде поля апостери-

орной вероятности. Этим самым обеспечивается значительное улучшение надежности обнаружения объекта на снимках ДЗЗ, а само научно-техническое решение является базой для разработки бортовых интеллектуальных СУ нового поколения.

Результаты обработки материалов вертолетных испытаний опытного образца МССР (2003-2006 г.г.) экспериментально подтвердили реальную возможность создания специализированного и, вместе с тем, *унифицированного* инструментального средства распознавания объекта наведения для каждого отдельного канала, а на их основе – гибридного метода, реализующего свойства адаптивного структурно-яркостного подхода в многоспектральных системах распознавания (рис. 4).

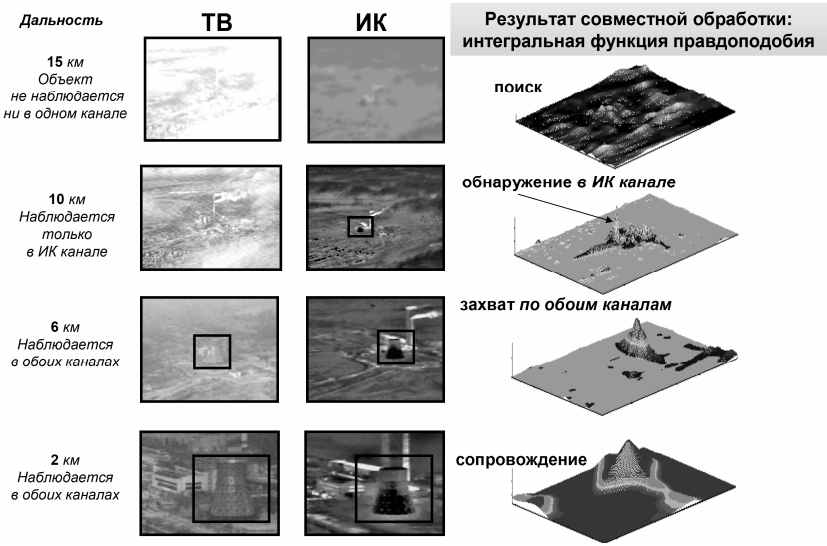


Рис. 4. Изменение наблюдаемости объекта (ТЭЦ) в ТВ и ИК каналах МССР при сближении (съемки 2003 г. с борта вертолета)

Отчет, выпущенный по результатам отработки гибридного метода и алгоритмов распознавания в многоспектральных системах, утвержден Генеральным директором – Генеральным конструктором ФГУП «НПО машиностроения».

5. Выводы. Разработан новый гибридный метод (и алгоритмы) совместной обработки изображений многоспектральной системы распознавания, реализация которого в разработках предприятия ставит НПО машиностроения в абсолютно выигрышную позицию по сравнению с другими предприятиями не только России, но и на мировом уровне. Аналогов методу не существует.

Метод основан на последовательном использовании адаптивных свойств структурно-зонных и яркостных алгоритмов распознавания и реализует принцип максимума правдоподобия.

Помимо совместной обработки синхронно получаемых по разным каналам кадров, гибридный метод позволяет осуществлять накопление результатов распознавания во времени по мере подлета к объекту, что значительно повышает вероятность ее раннего обнаружения в режиме селекции.

Полученные научно-технические результаты подтверждены экспериментально. Они позволяют уже в настоящее время приступить к разработке базовых программных модулей распознавания для бортового штатного ПМО – структурно-зонного и поэлементно-яркостного.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kozko Yu.A., Saveliev V.V. Identification of Terrain Imagery with Unstable Reflectivity. - AGARD Conference Proceedings No.556 «Dual Usage of Military and Commercial Technology in Guidance and Control», Rome, Italy, 1994.
2. Saveliev V.V. Geometrical Accuracy of Image Matching by Pixelwise and Zonal Classifiers. - Proceedings of the 2nd International Airborne Sensing Conference, ERIM, San-Francisco, USA, 1996.
3. Козко Ю.А., Савельев В.В. Разработка систем управления с автоматическим распознаванием образов. - Доклад на Секции Совета АН СССР по проблемам управления движением и навигации «Обработка изображений и распознавание образов в системах управления движущимися объектами», 1990.

УДК 681.3.068

Г.С. Иванова, К.А. Пасечников

ГЕНЕРАЦИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ СТРУКТУР ДАННЫХ ДЛЯ АЛГОРИТМОВ РЕШЕНИЯ КОМБИНАТОРНЫХ ЗАДАЧ НА ГРАФАХ

Для решения задач структурного синтеза требуется, как правило, большое количество ресурсов вычислительной системы (памяти и времени). Экономия ресурсов может быть достигнута посредством оптимизации алгоритма (или конкретной реализации алгоритма) решения задачи структурного синтеза. В [1] показано, что вычислительная сложность решения задач структурного синтеза зависит от выбора: метода, операций преобразования, способа представления графа множествами, структур данных для представления множеств. В работе приводится описание системы, позволяющей синтезировать оптимальные (согласно заданному критерию) структуры данных на основании информации о выполняемых операциях.

Система синтеза оптимальных структур данных состоит из модулей анализа входных данных и синтеза структур данных; анализатора вычислительной и ёмкостной сложности синтезированной структуры данных; библиотеки шаблонов описаний базовых конструкций структур данных; модуля генерации описания структур данных.

Исходными данными для системы синтеза оптимальных структур данных является информация об операциях, выполняемых над структурой данных, их типах и частоте выполнения, а также имеющиеся ограничения на ёмкостную сложность результирующей структуры данных. Перечень операций, равно как и информация о частоте их выполнения, могут быть получены при анализе описания алгоритма на уровне операций над графами или операций над множествами. На основании этой информации модулем анализа входных данных определяется тип структуры данных – одноуровневая, которая предназначена для хранения элементов одного множества, или многоуровневая, которая предназначена для хранения отношений между двумя множествами. В случае многоуровневой структуры данных определяется также тип отношения между элементами – «один к одному», «один ко многим» или «многие ко многим». Эта информация передаётся модулю синтеза структур данных.

На основании полученной информации модуль синтеза структур данных строит дерево решений, описывающее все возможные вариан-

ты построения результирующей структуры данных. Каждый вариант решения представляет собой модель структуры данных, отражающую её временные и ёмкостные характеристики. В качестве варианта решения может выступать следующие структуры. Базовая одноуровневая структура данных – список, массив и т. д. Комбинированная одноуровневая структура данных – результат объединения двух и более базовых структур данных (список с прямым доступом, комбинация дерева и списка и т. д.). Простая многоуровневая структура данных – структура данных, состоящая из базовых одноуровневых структур (список векторов, вектор списков и т. д.). Комбинированная многоуровневая структура данных – структура данных, включающая комбинированные одноуровневые структуры данных.

После построения дерева решений модуль синтеза осуществляет поиск оптимального решения исходя из соображений минимизации суммарной вычислительной сложности операций конкретного алгоритма над структурой данных и ограничения на ёмкостную сложность. Суммарная вычислительная сложность учитывает вычислительную сложность всех операций, выполняемых над структурой данных, а также частоту их выполнения. Фактически она представляет собой сумму произведений вычислительной сложности для каждой операции на частоту её выполнения. Определение соответствующих параметров выполняется при участии анализатора вычислительной и емкостной сложности.

По модели оптимальной структуры данных, полученной модулем синтеза, модуль генерации описания строит описание структуры данных на конкретном языке программирования. При построении описания структуры данных используется информация из библиотеки шаблонов классов описаний базовых конструкций.

Система синтеза оптимальных структур данных позволяет существенно упростить разработку и анализ алгоритмов решения задач структурного синтеза, предоставляя разработчику возможность получать оптимальные структуры данных, а также возможность сравнивать уже имеющиеся структуры данных по емкостным и вычислительным характеристикам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.А. Овчинников. Алгоритмизация комбинаторно-оптимизационных задач при проектировании ЭВМ и систем. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 288 с.

УДК 681.3

В.И. Мартынов, В.В. Савельев, И.А. Иванов

ОБНАРУЖЕНИЕ И СОПРОВОЖДЕНИЕ КОРАБЛЕЙ ПО СНИМКАМ ДЗЗ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОЙ ФОНО-ЦЕЛЕВОЙ ОБСТАНОВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ

В работе предложен метод решения задачи обнаружения и сопровождения кораблей в структурно сложной фоно-целевой обстановке. За счет сужения пространства рассматриваемых гипотез, метод исключает ложные обнаружения, вызванные существованием высококонтрастных объектов на суше. Метод также позволяет решать задачи классификации кораблей с оценкой их сравнительных размеров.

1. Введение. Повышение сложности задач, решаемых интеллектуальными СУ ЛА на базе методов распознавания образов, неизбежно приводит к необходимости усложнения логики их решения и комбинированного применения различных способов обработки изображений. Одной из таких задач является обнаружение и сопровождение объектов (стационарных и подвижных) на обзорных изображениях ДЗЗ в условиях сложной фоно-целевой обстановки. В частности, большой практический интерес представляет проблема контроля за передвижением кораблей вблизи береговой черты, например – в пределах структурно сложных (извилистых) бухт и фиордов.

Такая задача заметно отличается от традиционной задачи обнаружения стационарных объектов, расположенных на земной поверхности, своей априорной неопределенностью по ракурсу наблюдения объектов, по их размерам и координатам. Дополнительную и существенную сложность доставляют мешающие контрастные образования на участках суши, где кораблей заведомо быть не может.

Поэтому одним из ресурсов повышения надежности решения задачи в реальном масштабе времени является привлечение дополнительных средств, позволяющих сузить пространство рассматриваемых при проверке гипотез о координатах объектов на снимках ДЗЗ. К таким средствам следует отнести как очевидные аппаратурные решения (например, уменьшение размеров зоны поиска - так называемой зоны неопределенности), так и решения алгоритмические, присущие системам распознавания объектов на изображениях.

В настоящей работе рассматриваются именно алгоритмические возможности повышения надежности контроля (наблюдения) за передвижением кораблей в прибрежной зоне по снимкам ДЗЗ.

2. Общая схема решения задачи. При решении задачи контроля передвижения кораблей наибольший интерес представляет радиолокационный диапазон наблюдения, поскольку использование РЛС позволяет проводить наблюдение круглосуточно вне зависимости от погодных условий. Кроме того, корабли обладают высокой наблюдаемостью в РЛ диапазоне, что упрощает задачу их обнаружения, сводящуюся к поиску ярких (контрастных) объектов на достаточно однородной водной поверхности.

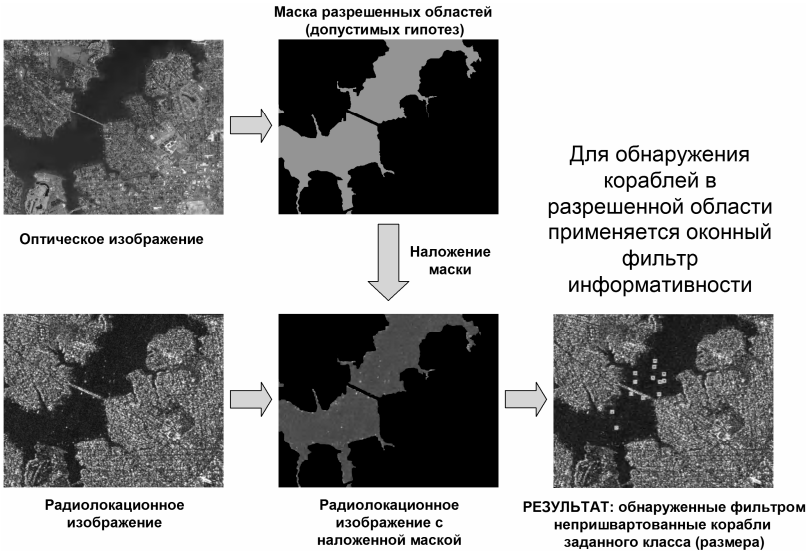


Рис.1. Общая схема обнаружения кораблей в сложной обстановке

Проблемой является слабое отличие кораблей от контрастных объектов, расположенных на суше. Поскольку корабли могут быть обнаружены только на водной поверхности, в работе предлагается сузить пространство рассматриваемых при поиске гипотез, путем наложения на РЛ снимок, так называемой, маски разрешенных областей (МРО). Такая маска (рис. 1) содержит информацию о конфигурации береговой линии и областях, в которых могут находиться корабли. Кроме того, что МРО позволяет избежать ложных обнаружений (рис. 2), ее использование дает преимущество при решении задачи поиска в реальном

масштабе времени, поскольку количество вычислений, которое необходимо выполнить значительно сокращается (за счет уменьшения зоны неопределенности).

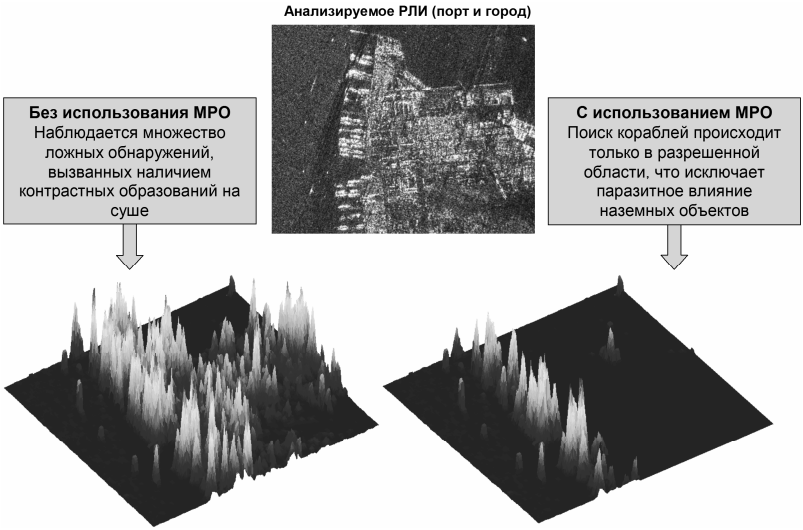


Рис. 2.

3. Наложение МРО. МРО должны подготавливаться заранее с учетом геометрии наблюдения земной и водной поверхностей. Исходными данными для этого могут являться оптические снимки местности, либо карта местности (рис. 3). Геометрия МРО должна максимально точно соответствовать геометрии получаемых снимков ДЗЗ.

Для такого совмещения МРО с наблюдаемым изображением (НИ) могут использоваться возможности глобальной системы спутниковой навигации путем соответствующих преобразований систем координат и пересчетов, вносящих заметные погрешности в результат взаимной привязки НИ и МРО.

Однако существует и другой, более эффективный способ совмещения, не требующий привлечения дополнительных внешних средств – это применение зонных алгоритмов [1] для обнаружения на НИ реперных фрагментов, по которым и производится совмещение изображений и МРО. Дело в том, что РЛИ прибрежных районов, сами по себе, имеют ярко выраженную зонную структуру: суша и водная поверхность образуют две зоны, которые хотя и не являются однородными, обладают высоким контрастом.

МРО, в свою очередь, является, по сути, зонным шаблоном (маской) с двумя зонами – сушей и водной поверхностью. Вышеизложенное позволяет проводить совмещение с помощью зонного алгоритма распознавания, используя в качестве изображения полученный снимок, а в качестве эталона - МРО. В результате максимум функции правдоподобия зонного алгоритма будет соответствовать правильному и весьма точному совмещению МРО и НИ (рис.4).

Заметим, что рассмотренный подход не требует существенных затрат вычислительных ресурсов и позволяет производить совмещение МРО и НИ с точностью порядка половины дискрета и лучше.

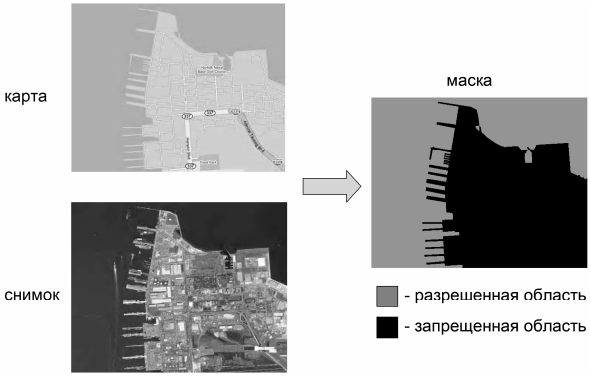


Рис. 3. Пример построения МРО

4. Фильтр информативности. Поиск кораблей в разрешенных областях НИ предлагается производить с использованием так называемого фильтра информативности, позволяющего обнаружить на изображении яркие контрастные образования. Особенностью этого фильтра является то, что его применение позволяет не учитывать тот факт, что нам априорно неизвестна ни ориентация, ни размер корабля.

Информативность первоначально была предложена [2] как аппарат оценки точности распознавания участка местности семейством алгоритмов, линейных относительно вектора наблюдений, то есть алгоритмами, решающая функция которых имеет вид:

$$\Phi\{z \mid a\} = c_1^T(a)z + c_2(a),$$

при условии $\frac{dc_1^T}{da}a = -\frac{dc_2}{da}$, где z - НИ, a - эталонное изображение.

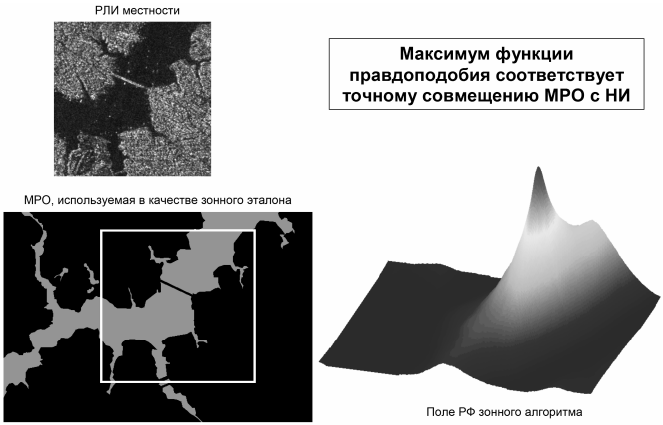


Рис. 4. Совмещение МРО с НИ с использованием зонного алгоритма распознавания

Для вычисления информативности НИ последовательно сканируется окном заданного размера, для каждого положения этого окна вычисляется значение, являющееся информативностью участка НИ, попавшего в окно. Значение информативности определяется по формуле:

$$\mathrm{Inf} = \left(\mathrm{cov}\,\vec{r}\right)^{-1} = \mathbf{T}\mathbf{B}^{-1}\mathbf{T},$$

где $\mathbf{T} = \mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{C}\mathbf{A}$, $\mathbf{B} = \mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{C}^{\mathrm{T}}\mathbf{D}_Z\mathbf{C}\mathbf{A}$ – фундаментальные матрицы, определяющие информативность: $\mathbf{A} = \dfrac{d\mathbf{a}}{d\tau}$ – характеризует яркостно- дифференциальные свойства изображения, чем больше на изображении резких перепадов яркости и чем больше их размах, тем больше будут элементы этой матрицы; $\mathbf{C} = \dfrac{d\mathbf{c}_1}{d\mathbf{a}}$ – зависит от функционального вида алгоритма распознавания; $\mathbf{D}_Z = \mathrm{Cov}(\mathbf{z}) = <(\mathbf{z}-\mathbf{a})(\mathbf{z}-\mathbf{a})^T>|_\lambda$ – ковариация шумов вектора изображения.

Значение информативности зависит от свойств попавшего в окно участка местности (в первую очередь, контраста), а также свойств устройства наблюдения (шумы, спектральный диапазон). Для аддитивной модели шумов, характерной для оптического и ИК диапазона, получаем:

$$\mathrm{Inf} = \sigma^{-2} A^T A$$

Для мультипликативной модели шумов, характерной для радиолокационных изображений, имеем:

$$\mathbf{Inf} = \mathbf{A}^{\mathrm{T}}\mathbf{D}_{Z}^{-1}\mathbf{A}$$

Поиск кораблей заключается в сравнении значения информативности с некоторым пороговым уровнем: если порог превышен, принимается решение, что внутри окна обнаружен корабль.

Большое значение для успешного процесса обнаружения кораблей имеет адекватный выбор размеров окна, которым сканируется НИ. Необходимо учитывать, что слишком большой размер окна может привести к тому, что несколько близко расположенных кораблей будут распознаны как один, а слишком маленький – к тому, что протяженный корабль может быть распознан как несколько кораблей меньшего размера (рис.5). По предварительным оценкам, оптимальным является размер окна приблизительно соответствующий наибольшему ожидаемому размеру корабля, а он может быть вычислен, исходя из геометрии наблюдения.

5. Оценка размеров обнаруженных кораблей. Если размер окна, которым сканируется НИ, выбран в соответствии с изложенным выше, у предлагаемого метода обнаружения появляется еще одно полезное свойство. Поскольку для каждого положения окна вычисляется суммарное значение дифференциала яркости, значение информативности будет тем больше, чем большую площадь окна занимает контрастное образование.

Если корабль приблизительно соответствует размеру окна, значение информативности для него будет максимальным (для данного размера окна). Любое отклонение от этого положение приведет к тому, что по яркости водной поверхности – значение информативности станет меньше. В соответствующем месте поля информативности для такого корабля будет наблюдаться заостренный пик.

Если корабль занимает только часть площади окна, значение информативности для него будет меньше максимального, при чем тем меньше, чем меньше размер корабля. Поскольку корабль занимает только часть площади окна, перемещение рамки в окрестностях корабля не приводит к изменению значения информативности – соответствующий пик на поле информативности получается более пологим, в форме плато. Для определения точных координат корабля требуется вычислить центр такого плато.

Таким образом, данные свойства фильтра позволяют судить о размере корабля по значению информативности в точке обнаружения. Устанавливая различные значения порогового уровня информативно-

сти, можно проводить поиск только кораблей определенного размера, например, отслеживать перемещения танкеров или траулеров.

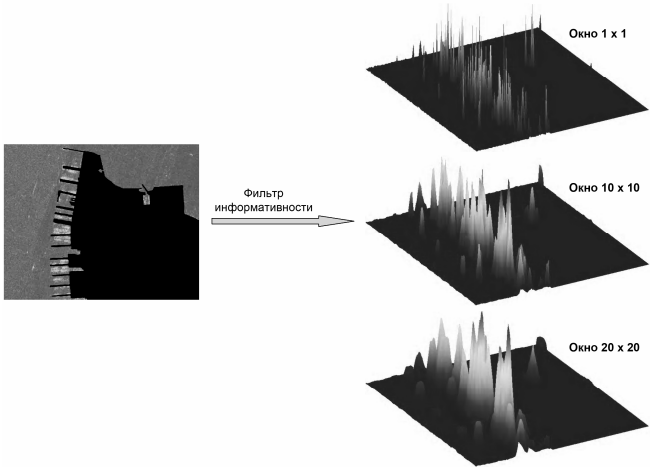


Рис. 5. Влияние размера окна на получаемые поля информативности

6. Экспериментальные результаты. Для отработки предложенного метода использовались РЛ и оптические снимки района г. Норфолк (США), взятые из открытых источников.

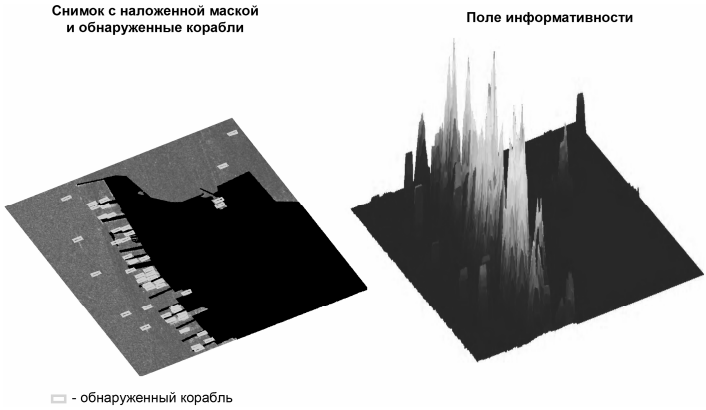


Рис. 6. Результат работы алгоритма

Экспериментальные данные подтвердили эффективность предложенной методики обнаружения кораблей.

На рис.6 представлен результат работы алгоритма. В качестве изображения был взят РЛ снимок стоянки кораблей, для обнаружения использовался фильтр информативности с размером окна 20x5. В результате работы алгоритма были точно определены координаты большинства кораблей, ошибки наблюдаются только в местах большого скопления судов, сливающихся в одно яркое пятно. Во избежание подобных ошибок необходимо улучшать разрешение снимков.

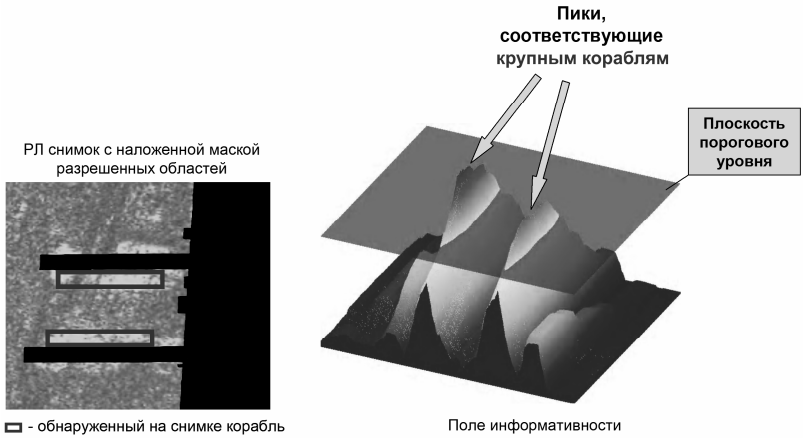


Рис. 7. Обнаружение крупных кораблей

На рис.7 представлен пример обнаружения кораблей заданного размера. У причала стоят два крупных корабля и два корабля меньшего размера. Наложив МРО на соответствующее РЛИ и применив фильтр информативности с размером окна, близким размеру танкера согласно геометрии визирования, получаем представленное на рисунке поле информативности. По результату видно, что произошло обнаружение всех четырех кораблей, однако, как и следовало ожидать, значение информативности для танкеров значительно выше, чем для кораблей меньшего размера. Таким образом, если стоит задача поиска только больших танкеров, то установка соответствующего значения порогового уровня позволяет отделить их от других кораблей.

7. Выводы. Предложен метод решения задачи обнаружения и сопровождения кораблей в структурно сложной фоно-целевой обстановке – в прибрежной зоне, в бухтах, реках, и фиордах.

Его базовые составляющие – (а) высокоточная привязка снимков ДЗЗ к картографической основе с формированием маски, ограничивающей пространство рассматриваемых гипотез, и (б) применение критериев оценки информативности изображений, учитывающих статистические свойства шумов наблюдения (оптика, ИК, РЛС и т.п.).

Реализация метода обеспечивает наблюдение и контроль за размещением и перемещением кораблей вблизи береговой линии, бухтах и фиордах, когда за счет сужения пространства рассматриваемых гипотез исключаются ложные обнаружения, вызванные существованием высококонтрастных объектов на суше.

Метод также позволяет решать задачи классификации кораблей с оценкой их сравнительных размеров, включая группы, пришвартованные у причалов. Алгоритм обнаружения инвариантен к ракурсу визирования корабля. Возможно выделение и сопровождение кораблей определенного размера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kozko Yu.A., Saveliev V.V. Identification of Terrain Imagery with Unstable Reflectivity. - AGARD Conference Proceedings No.556 «Dual Usage of Military and Commercial Technology in Guidance and Control», Rome, Italy, 1994.
2. Saveliev V.V. Geometrical Accuracy of Image Matching by Pixelwise and Zonal Classifiers. - Proceedings of the 2nd International Airborne Sensing Conference, ERIM, San-Francisco, USA, 1996.

УДК 681.3

Г.С. Иванова, А.В.Тарасов

РАСПОЗНАВАНИЕ ТИПОВЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ ПРОГРАММЫ ПО ОПЕРАЦИОННО-ЛОГИЧЕСКОЙ ИСТОРИИ ВЫПОЛНЕНИЯ

В качестве одного из подходов к распознаванию типовых функциональных блоков предлагается способ, основанный на анализе операционно-логической истории (трассы) [6] выполнения программы.

1. Введение. В [1] и [2] описана проблема анализа программ по исходным текстам. Целью анализа является построение модели функционирования программы. Эта модель должна представлять программу в виде совокупности функциональных компонентов, давать краткую неформальную, ориентированную на восприятие человеком спецификацию каждого компонента, а также отражать способы взаимодействия указанных компонентов между собой. При этом функциональные компоненты программы должны быть представлены в виде «черных ящиков» с заданной спецификацией вход/выход. На вход черного ящика поступает набор исходных данных. В процессе работы набор исходных данных преобразуется в результирующий набор. Результирующий набор данных поступает на выход черного ящика. Между исходным и результирующим наборами данных существует зависимость, которую в общем виде отражает спецификация функционального компонента.

За счет представления программы в виде функциональных компонентов из рассмотрения исключаются несущественные для анализа особенности внутренней организации и, как следствие, достигается общее упрощение представления программы на функциональном уровне. Аналогичные модели широко используются при проектировании программы, где также требуется высокий уровень абстракции представления функциональной структуры программы [5].

2. Распознавание типовых функциональных блоков. В [3] было высказано предположение, что компоненты разных программных комплексов сравнительно часто имеют однотипные функциональные характеристики и, соответственно, одинаковые или похожие спецификации вход/выход. При этом, несмотря на схожесть спецификаций, внутренняя организация и особенности реализации указанных компонентов могут существенно отличатся друг от друга. Также в [3] приве-

дены примеры таких компонентов и даны неформальные описания их спецификаций.

Учитывая распространенность компонентов с однотипными характеристиками в современных программных комплексах, можно утверждать, что их автоматизированное распознавание позволило бы значительно упростить решение проблемы анализа программ по исходным текстам [1, 2].

В качестве одного из подходов к распознаванию типовых функциональных блоков предлагается способ, основанный на анализе операционно-логической истории (трассы) [6] выполнения программы.

Данный способ представляет собой последовательность следующих шагов (рис. 1):

1. Исполнение анализируемой программы на специализированной виртуальной машине, возвращающей операционно-логическую истории ее выполнения. 2. Анализ операционно-логической истории программы и построение по ней модели изменения данных, отражающей совокупность преобразований данных в процессе выполнения программы. 1. Выделение типовых функциональных компонентов в соответствии с моделью изменения данных и базой спецификаций типовых функциональных компонентов.

Вопросы получения операционно-логической истории выполнения программы хорошо изучены и представляют собой чисто техническую задачу.

Модель изменения данных и способ перехода к ней от операционно-логической истории рассмотрены в [4]. Данная модель представляет процесс выполнения программы в виде зависимости между входными и результирующими значениями отдельных операторов. Также сформулированы правила структурного упрощения модели изменения данных, которые позволяют исключить из рассмотрения промежуточные значения вычислений и получать описание процесса выполнения программы в виде соотношения вход\выход, соответствующего представлению функциональных компонентов.

3. Расширение модели. Существенным недостатком указанной модели является то, что она описывает изменения только для скалярных данных, и опускает из рассмотрения изменения структур данных.

Указанный недостаток может быть устранен за счет расширения модели описанием структур данных из [7] и соответствующими правилами перехода от операционно-логической истории для операторов обработки структур данных.

Для создания базы спецификаций необходимо формализовать основные качественные и количественные характеристики типовых

функциональных компонентов и разработать язык их описания. Основные концепции такого языка описаны в [3] и [4].

Рис. 1. Схема способа распознавания типовых функциональных компонентов, основанного на анализе операционно-логической истории выполнения программы

Выделение типовых функциональных компонентов подразумевает сопоставление фрагментов модели изменения данных с отдельными спецификациями из базы спецификаций. Основу метода выделения составляет целевая функция соответствия между спецификацией и фрагментом модели изменения данных. Функция должна задавать численную меру соответствия фрагмента модели изменения данных качественным и количественным характеристикам, описанным в спецификации. На данный момент вопросы создания такой функции проработаны слабо и нуждаются в дальнейшем исследовании.

4. Выводы. Для разработки практически применимого метода распознавания типовых функциональных компонентов программ по операционно-логической истории требуется:

– доработка модели изменения данных [4] для поддержки структур данных;
– формализация качественных и количественных характеристик типовых функциональных компонентов;
– разработка функции соответствия между спецификацией типового функционального компонента и соответствующими фрагментами модели изменения данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасов А.В. Построение структурных моделей программ по результатам анализа исходных текстов // Современные информационные технологии: Сборник докладов и сообщений Межвузовской научно-технической аспирантов и студентов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – С. 23–25.
2. Тарасов А.В. Проблема структурного анализа программ по исходным текстам. http://program-analysis.narod.ru/problem.doc
3. Тарасов А.В. Распознавание типовых функциональных фрагментов программ по исходным текстам. http://program-analysis.narod.ru/raspoznovanie.rtf
4. Тарасов А.В. Модель изменения данных. http://program-analysis.narod.ru/model.doc
5. Росс Д. Структурный анализ: язык для передачи понимания//Требования и спецификации в разработке программ. – М.: Мир, 1984. – С. 35–43.
6. Воеводин В.В., Воеводин Вл.В. Параллельные вычисления. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002.
7. Иванова Г.С. Математические модели структур данных // Информационные технологии – 2006. – №9. – С. 44-52.

УДК 621.397

В.В. Савельев, С.А. Туркин

РАСПОЗНАВАНИЕ ОБЪЕКТОВ НА ОПТИЧЕСКОМ ИЗОБРАЖЕНИИ В УСЛОВИЯХ ВОЗМОЖНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ИХ ОРИЕНТАЦИИ

Дан анализ проблемы распознавания объектов в условиях возможности изменения их ориентации на изображении. Обсуждается постановка задачи разработки алгоритма распознавания, инвариантного к повороту объекта. Предложен метод решения поставленной задачи, основанный на использовании аппарата нейронных сетей.

1. Введение. Распознавание объектов на оптических изображениях находит применение в решении различных технических задач. Это и ввод текста в ЭВМ, и различные системы контроля доступа, системы технического зрения роботов, системы управления БПЛА (беспилотные летательные аппараты) и т.д. Каждая из задач содержит свои характерные особенности, но все они имеют среди конечных целей соотнесение анализируемого изображения с одним из заложенных в системе классов (т.е. задача классификации изображений). Существует достаточно много алгоритмов распознавания, основанных на различных подходах, каждый из которых эффективен в определенной прикладной области.

Один из классов таких алгоритмов составляют алгоритмы, в основе которых лежит распознавание объектов с использованием шаблонов (эталонов). Эти алгоритмы достаточно просты в своей реализации, за счет чего время их выполнения мало. Указанный факт дает преимущество использования таких алгоритмов в задачах, где время решения должно быть достаточно малым (в частности системы технического зрения и системы навигации БПЛА). Но у отмеченного класса есть и недостатки, одним из которых является свойство статичности эталона по отношению к условиям визирования объекта. Оно заключается в том, что, как правило, эталон синтезируется заранее перед распознаванием изображения, предполагая, что условия визирования на этапе распознавания будут соответствовать ожидаемым.

Но в действительности бывают ситуации, когда отклонения таких условий бывают значительными. В результате этого полученное для анализа изображение содержит искажения, одной из причин которых может быть изменение ориентации объекта на оптическом снимке. Такая ситуация может возникнуть, если за время подлета ЛА объект

поиска изменил свою ориентацию на плоскости визирования. Кроме того искажения типа поворот могут возникнуть в случае поворота ЛА вокруг своей оси, и система навигации не может определить его величину. Значительные искажения не просто снижают точность работы шаблонных алгоритмов, но иногда делают их использование невозможным.

Указанный недостаток можно исключить следующими путями:

1. Модификация заранее синтезированного эталона под текущие условия визирования. Такой подход сложен в реализации тем, что необходимо определение параметров корректирующего линейного преобразования, что далеко не всегда бывает возможным.

2. Использование в качестве эталона не самого изображения опорных участков, а ряда параметров, которые не реагируют на присутствие искажений [2]. Этот метод нетривиален поиском параметров, которые должны не только не реагировать на присутствие искажений, но и однозначно описывать эталон. На данный момент, указанный подход не проработан.

Можно сделать вывод, что проблема синтеза шаблонного алгоритма распознавания, невосприимчивого к искажениям типа «поворот», сегодня остается достаточно актуальной. В работе описывается разработка одного из возможных методов решения поставленной проблемы, построенного на основе нейронной сети.

2. Анализ задачи и метод ее решения. Рассмотрим, как работают шаблонные алгоритмы распознавания, построенные на принципе скользящего окна, в инверсной схеме измерения: 1. В изображении выделяется окно размером $\boldsymbol{m} \times \boldsymbol{n}$, где $\boldsymbol{m}$, $\boldsymbol{n}$ – размеры эталона. 2. Вычисляется суммарное расстояние между соответствующими пикселями (или группами пикселей) эталона и изображения в окне. Полученное суммарное расстояние является значением функции выхода $F(i,j)$. Здесь i, j, – смещения окна на изображении соответственно по горизонтальной и вертикальной осям. 3. Шаги 1 и 2 выполняются для каждой точки (i, j), и строится поле значений функции выхода $F(i, j)$. 4. Фрагмент изображения, максимально похожий на эталон, соответствует экстремуму функции выхода.

В реализации данных алгоритмов на ЭВМ используется построчное сканирование изображения. Если объект поиска повернут на некоторый угол, то при построчном анализе ориентация направлений сканирования эталона и изображения объекта поиска в окне не совпадают. Поэтому текущий эталон становится непригодным для использования в алгоритме распознавания.

Для решения указанной проблемы предложен метод кругового сканирования (рис 1).

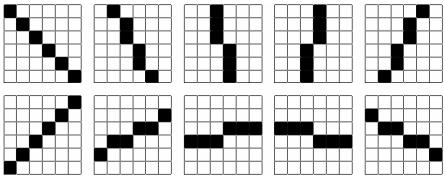


Рис. 1. Круговое сканирование изображения (черным цветом закрашены пиксели, соответствующие определенному направлению сканирования)

Здесь используется тот принцип, что при круговом сканировании изображения, независимо от его ориентации, в описанной около него окружности мы проходим через одни и те же направления сканирования (в той же последовательности, но циклически сдвинутых на угол поворота изображения). Т.о. предложенный метод ставит следующее ограничение на размеры эталона: эталон должен быть размером n **?** n, где n – минимальный диаметр окружности, которая может быть описана около всех информативных элементов эталона.

В качестве входных данных для алгоритма распознавания используются только те пиксели, которые попадают в границы описанной около эталона окружности. В связи с этим возникает проблема изменения частоты дискретизации изображения с изменением направления (см. рис. 2)

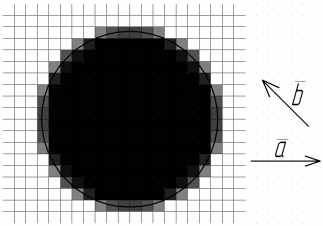


Рис. 2. Иллюстрация изменения частоты дискретизации изображения с изменением направления сканирования

На рис. 2 показано, что вдоль направления $\bar{a}$ (относительно центра окружности) изображение составляют 16 отсчетов (строк). В направлении $\bar{b}$ (относительно центра окружности) изображение со-

ставляют 12 отсчетов. Это связано с квадратной формой пикселя. В общем случае

$$f_{\max} / f_{\min} = \sqrt{2}, \quad f \sim N, \qquad (1)$$

где f – частота дискретизации изображения вдоль прямой, проходящей через центр описанной окружности, $f_{\max}$ и $f_{\min}$ – соответственно её максимальное и минимальное значения; N – число пикселей, составляющих диаметр описанной окружности вдоль заданного направления.

При работе алгоритма необходима постоянная частота дискретизации по направлению. Поэтому, прежде чем подавать данные на вход алгоритма, их необходимо подвергнуть процессу передискретизации.

3. Идея метода преобразования состоит в следующем: за основную частоту дискретизации берется $f_{\max}$, а все остальные выборки подвергаются процедуре расширения. Такой подход обоснован тем, что характеризуется минимальными потерями информации об изображении за счет уменьшения числа отсчетов, представляющих его.

Алгоритм распознавания:

Поиск строки эталона, максимально схожей с анализируемой строкой изображения в текущем окне. Тем самым мы *определяем начальный фрагмент* (фрагменты) в круговом представлении эталона.

Для каждой анализируемой строки изображения *вычисляем функцию расстояния* по отношению к соответствующей строке эталона (с соблюдением последовательности следования фрагментов).

Все полученные *расстояния складываем* и получаем значение функции выхода $F(i, j)$, где i, j – текущее смещение окна на анализируемом изображении.

Первый этап алгоритма подразумевает выполнение ассоциативного поиска (т.е. по значению элемента последовательности определяется его номер в ней). Чтобы ускорить этот процесс, его желательно разбить на отдельные части, выполняемые параллельно. Кроме того, в качестве структуры для хранения информации об эталоне используется кольцевой буфер, где каждый его элемент хранит информацию о соответствующей строке изображения. Такую структуру достаточно просто смоделировать с использованием аппарата нейронных сетей. Именно этот подход был выбран в реализации алгоритма.

4. Построение нейронной сети. Структура нейронной сети, предложенной для реализации алгоритма распознавания, представлена на рис. 2.

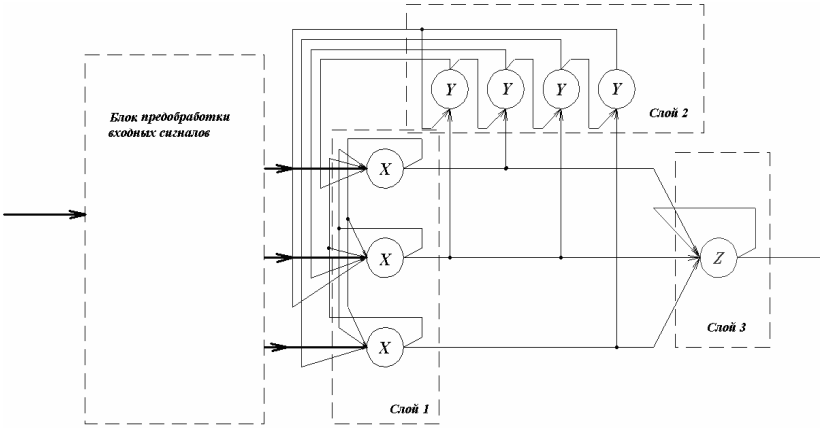


Рис. 2. Нейронная сеть, реализующая алгоритм распознавания

Сеть состоит из 3 слоев. На входе сети расположен блок предобработки входных сигналов. Его назначением является коррекция частоты дискретизации входной строки с изменением направления сканирования. *Слой 1* – вычислительный слой. Он представлен нейронами типа ***X*** (рис. 3).

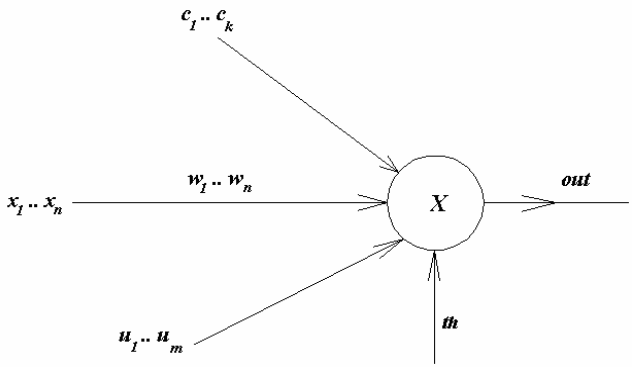


Рис. 3. Нейрон типа X

Математическая модель нейрона имеет вид:

$$\begin{cases} Xout = \operatorname{sign}(\underset{l=1}{\overset{m}{\vee}} u_l)\operatorname{sign}\left[f_{act}(X) - \max\limits_{j=1}^{k} c_j + th \right] f_{act}(X), \\ f_{act}(X) = \left(\sum\limits_{i=1}^{n} w_i x_i \right) \cdot \left(\sum\limits_{i=1}^{n} x_i^{\,2} \right)^{-1/2}. \end{cases} \qquad (2)$$

Здесь ***n*** – размер входной строки, полученной на выходе блока предобработки входных сигналов; ***k*** – количество входов торможения от соседних нейронов слоя (для реализации механизма конкуренции); ***m*** – количество входов возбуждения от нейронов *Слоя 2*.

Нейрон типа ***X*** функционирует следующим образом:
Активность нейрона определяется значениями сигналов на входах возбуждения u_l и входах торможения c_j. Если хотя бы один из сигналов возбуждения активен (на входе единичное значение), и максимальный сигнал превышает значение функции активации нейрона на величину, не большую величины порога th, то нейрон активен, и на выходе его устанавливается значение, равное значению функции активации. В противном случае нейрон пассивен (заторможен), и на его выходе формируется нулевой сигнал.

Здесь используется принцип конкуренции, заключающийся в том, что нейроны слоя конкурируют за текущую активность за счет подачи своих выходных значений на входы торможения всех остальных нейронов слоя. Порог th введен для реализации возможности распознавания слоем зашумленных изображений.

Слой 2 – слой управления. Он хранит структуру эталона (последовательность следования строк в эталоне). Слой состоит из нейронов типа ***Y*** (см. рис. 4).

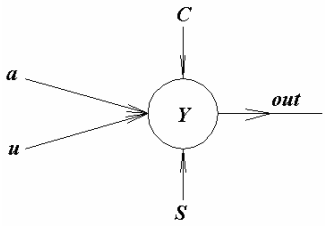


Рис. 4. Нейрон типа Y

Вход ***C*** – вход синхронизации (т.е. нейрон изменяет свое состояние только при положительном перепаде синхросигнала). Вход ***S*** – асинхронный вход перевода нейрона в возбужденное состояние (выход нейрона устанавливается в единичное состояние независимо от значений на других входах нейрона). u – входное значение с выхода соответствующего нейрона Слоя 1. a – входное значение с выхода соседнего нейрона текущего слоя.

Математическая модель нейрона имеет следующий вид:

$$Yout = S \vee (a \wedge u) \qquad (3)$$

Т.к. нейрон синхронный, то устанавливается следующее ограничение на моменты функционирования слоев сети: Слой 1 функционирует в нечетные моменты времени (или по положительному перепаду сигнала ***C***), Слой 2 и Слой 3 функционируют в четные моменты времени (или по отрицательному перепаду сигнала ***C***).

Слой 3 – выходной слой. Он формирует значение функции выхода алгоритма для заданного смещения окна на изображении. Слой состоит из единственного нейрона типа ***Z*** (см. рис. 5).

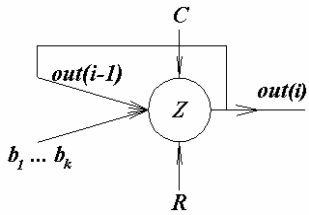


Рис. 5. Нейрон типа Z

Вход ***C*** – вход синхронизации, ***R*** – асинхронный вход торможения нейрона (выход нейрона устанавливается в ноль), b_h - входное значение с выхода h-го нейрона Слоя 1.

Математическая модель нейрона имеет следующий вид:

$$Zout(i) = \overline{R} \bullet \left[Zout(i-1) + \frac{1}{1.01 - B_h} \right], \; B_h = \left(\sum_{h=1}^{k} b_h \right) \cdot \left(\sum_{h=1}^{k} sign\left(b_h\right) \right)^{-1}, \qquad (4)$$

где i – номер анализируемой строки.

Значение функции отклика алгоритма устанавливается на выходе нейрона после обработки последней строки изображения в окне.

5. Алгоритм обучения сети. На момент начала обучения уже известен размер эталона (т.е. количество нейронов во втором слое

StructSize). Также заданы порог *th* и минимальный уровень выходного сигнала, при котором нейрон распознает поданную на его вход строку, *MinOut* для нейрона Слоя 1 (причем $MinOut > th$). Поэтому в начальный момент структура сети следующая:

Слой 1 - содержит 1 нейрон, на его вход u_1 поступает сигнал с выхода первого нейрона Слоя 2;

Слой 2 – содержит r нейронов, где r - количество строк, составляющих эталон. На вход u 2-го нейрона поступает сигнал с выхода 1-го нейрона Слоя 1;

Слой 3 – содержит 1 нейрон, на его вход b_1 поступает сигнал с выхода первого нейрона Слоя 1.

Шаг 1: Инициализировать весовые коэффициенты w_{1i} 1-го нейрона Слоя 1 нормированными значениями входных отсчетов, составляющих первую строку эталона:

$$w_{1i} := x_{1i} \cdot \left(\sum_{i=1}^{n} x_{1i}^{\,2} \right)^{-\frac{1}{2}}, \qquad (5)$$

где x_{1i} – значение i - го отсчета 1- й строки эталона. Устанавливаем счетчик строк *CTR* в единичное значение. Подать на вход сети первую строку эталона.

Шаг 2: Выполнить сброс выходного слоя сети (т.е. подать на входы ***R*** нейронов Слоя 3 единичное значение).

Шаг 3: $CTR := CTR + 1$. Подать на вход сети следующую строку эталона. Если выход сети больше *MinOut* , тогда перейти к шагу 4. Иначе:

1. В текущем активном нейроне Слоя 1 (с номером j) добавить вход u_{e+1} (где e – число уже имеющихся связей j -го нейрона Слоя 1 с нейронами слоя 2) и подать на него сигнал с выхода нейрона Слоя 2 с номером *CTR* .

2. В на вход u нейрона Слоя 2 с номером $(CTR \bmod StructSize) + 1$ подать сигнал с выхода j -го нейрона Слоя 1.

Если $CTR < StructSize$, перейти к выполнению шага 2. Иначе перейти к выполнению шага 5.

Шаг 4: Добавить в Слой 1 нейрон с номером $q+1$, где q – количество нейронов в Слое 1. Инициализировать нейрон: 1). На вход u_1 подать сигнал с выхода *CTR* -го нейрона Слоя 2. 2). На вход u ($(CTR \bmod StructSize) + 1$)-го нейрона Слоя 2 подать выходной сигнал

нейрона. 3). Инициализировать весовые коэффициенты $w_{(q+1)i}$ значениями:

$$w_{(q+1)i} := \left(x_{CTRi}\right) \cdot \left(\sum_{i=1}^{n} {x_{CTRi}}^2 \right)^{-1/2}. \qquad (6)$$

В нейроне Слоя 3 добавить вход b_{q+1} и подать на него сигнал с выхода $(q+1)$-го нейрона Слоя 1.

Если $CTR < StructSize$, перейти к выполнению шага 2. Иначе перейти к выполнению шага 5.

Шаг 5: Закончить обучение сети.

6. Выводы. Предложен алгоритм распознавания объекта по его изображению, повернутому по отношению к эталону. Он использует в своей реализации 3-слойную нейронную сеть.

Решены следующие задачи:

Разработан метод анализа изображения, инвариантного к его повороту относительно эталона.

Построена нейронная сеть, реализующая алгоритм распознавания.

Разработан алгоритм обучения нейронной сети.

Использование нейронной сети в алгоритме распознавания позволило выделить в нем участки с возможностью параллельного выполнения, разбить алгоритм на однородные вычислительные блоки, для которых могут быть использованы специализированные вычислители.

Следующим шагом в исследовании алгоритма является его моделирование на ЭВМ с целью улучшения его характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Л.Г. Комарцова, А.В. Максимов Нейрокомпьютеры / М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000г.
2. А.Н. Каркищенко, С.А. Бутенков, В.В. Кривша Нечеткие геометрические признаки в задачах классификации и кластеризации / Жур. «Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы», № 2 (6), 2001г, с. 24-30.
3. Л.М. Гольденберг, Б.Д. Матюшкин, М.Н. Поляк Цифровая обработка сигналов – Москва, «Радио и связь», 1990 г., 256 с.

УДК 681.324

И.В. Елизаветин, Р.И. Шувалов

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ РАЗВЕРТКИ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ ФАЗЫ НА ОСНОВЕ БАЙЕСОВСКОГО ПОДХОДА

Приведена обобщенная регуляризованная постановка задачи развертки фазы. Предложена классификация методов развертки фазы по типу применяемой регуляризации. Разработан новый метод решения задачи развертки фазы на основе байесовского подхода. Представлены результаты экспериментальной проверки точности предложенного метода. Дана общая математическая постановка задачи развертки фазы, и показана ее некорректность.

1. Введение. Один из подходов к исследованию интересующего объекта окружающего мира состоит в получении, обработке и анализе изображений этого объекта. Наиболее точными методами измерений являются интерферометрические методы, основанные на использовании эффекта интерференции волн, и заключающиеся в анализе фазовой информации. Интерферометрические системы формирования изображений позволяют получать массивы главных (известных по модулю 2π радиан) значений разностей фаз – интерферограммы. Но реальный физический смысл имеет массив абсолютных значений фазовых разностей. Поэтому встает задача восстановления массива абсолютных фазовых значений по массиву (возможно неполному) главных значений фазы, искаженных действием шума. Такая задача называется задачей развертки фазы.

В настоящей работе задача развертки фазы рассматривается в контексте интерферометрической технологии формирования цифровой модели рельефа (ЦМР) подстилающей поверхности по данным радиолокатора с синтезированной апертурой антенны (РСА), устанавливаемого на борту космического аппарата.

Задача развертки фазы относится к классу обратных некорректно поставленных задач. Поэтому имеет большое значение возможность учитывать при ее решении всю имеющуюся априорную информацию. Естественным образом инкапсулировать такого рода информацию в математическую постановку задачи позволяет байесовский формализм.

2. Интерферометрическая технология. Интерферометрический метод измерений основан на использовании эффекта интерфе-

ренции электромагнитных волн. Когерентным датчиком для проведения интерферометрических измерений является радиолокатор с синтезированной апертурой антенны, устанавливаемый на борту космического аппарата. Радиолокационная съемка заключается в облучении подстилающей поверхности электромагнитными импульсами и измерении вернувшегося к радиолокатору сигнала. Данные двух радиолокационных съемок одного и того же участка подстилающей поверхности, выполненных при различных положениях в пространстве приемной антенны радиолокатора, являются исходными для интерферометрического метода.

Интерферометрический метод восстановления рельефа подстилающей поверхности по радиолокационным данным состоит в формировании интерферограммы по результатам двух радиолокационных съемок и извлечения из нее топографической информации (рис. 1.).

Рис. 1. Блок-схема интерферометрической технологии построения цифровой модели рельефа по радиолокационным данным РСА.

3. Математическая постановка задачи развертки фазы. Непосредственному измерению приемной аппаратурой доступна напряженность электромагнитного поля, обусловленная распространяющейся электромагнитной волной. Измеряя напряженность поля в данной точке пространства в два момента времени разделенные промежутком в четверть периода волнового процесса (или в данный момент времени в двух точках пространства разделенных расстоянием в четверть длины волны), можно определить амплитуду a и главное значение φ фазы принимаемого сигнала:

$$a = \sqrt{e_1^2 + e_2^2}\ , \qquad \varphi = arctg\,\frac{e_2}{e_1}\ , \tag{1}$$

здесь e_1, e_2 – измеренные напряженности электромагнитного поля.

Зарегистрированный сигнал удобно считать комплексным:

$$e = e_1 + ie_2\ , \tag{2}$$

так как квадратурная компонента e_2 повернута относительно синфазной компоненты e_1 на угол равный 0.5π радиан. Выражение (2) с учетом (1) можно записать в виде:

$$e = a\exp\{i\psi\} = a\exp\{i(\varphi + 2\pi c)\}\ ,\ k \in \mathbb{Z}\ , \tag{3}$$

где ψ – абсолютное значение фазы, c – неизвестное целое число.

Приемная аппаратура измеряет электромагнитный сигнал, приходящий от различных точек рассеивающей поверхности, и формирует двумерный массив комплексных величин – цифровое изображение рассеивающей поверхности:

$$E = \{e_{mn}\}\ ,\ m = 1,...,M\ ,\ n = 1,...,N\ . \tag{4}$$

Два изображения одной и той же подстилающей поверхности, полученные под различными углами наблюдения, при определенных условиях по геометрии съемки образуют интерферометрическую пару. Одно из изображений интерферометрической пары условно называется основным, а другое – вспомогательным.

Интерферограммой называется двумерный массив комплексных величин, каждая из которых является комплексным произведением некоторого элемента основного изображения на комплексно сопряженную величину к соответствующему элементу вспомогательного изображения интерферометрической пары:

$$I = \{i_{mn}\}\ ,\ m = 1,...,M\ ,\ n = 1,...,N\ , \tag{5}$$

$$i_{mn} = e^M_{mn}\overline{e}^S_{mn} = a^M_{mn}a^S_{mn}\exp\left\{j\left(\psi^M_{mn} - \psi^S_{mn}\right)\right\} = a_{mn}\exp\{j\psi_{mn}\}\ , \tag{6}$$

здесь ψ_{mn} – абсолютная интерферометрическая фаза элемента (m,n), a_{mn} – интерферометрическая амплитуда элемента (m,n).

Матрицей абсолютной фазы называется двумерный массив $\Psi = \{\psi_{mn}\}$ действительных величин абсолютных интерферометрических фаз. Областью значений абсолютной фазы является множество действительных чисел: $\psi \in \mathbb{R}$. Обобщением на непрерывный случай является скалярное поле Ψ абсолютной фазы определенное на замкнутом ограниченном множестве Ω:

$$\Psi:\ \Omega \to \mathbb{R},\ \Omega \subset \mathbb{R}^2.$$

Матрицей относительной фазы называется двумерный массив $\Phi = \{\varphi_{mn} = \arg\{i_{mn}\}\}$ действительных величин главных значений абсолютной интерферометрической фазы. Областью значений относительной фазы является полуинтервал действительной оси: $\varphi \in (-\pi;\pi]$. Обобщением на непрерывный случай является скалярное поле Φ относительной фазы определенное на замкнутом ограниченном множестве Ω:

$$\Phi:\ \Omega \to (-\pi;\pi],\ \Omega \subset \mathbb{R}^2,\ (-\pi;\pi] \subset \mathbb{R}.$$

Операция реконструкции поля (матрицы) абсолютной фазы по известному полю относительной фазы (по известной матрице) называется разверткой фазы.

Оператором свертки (по модулю 2π радиан) называется оператор, определяемый выражением:

$$Wr[\psi] = \arg\{\exp\{j\psi\}\},\ \psi \in \mathbb{R}. \qquad (7)$$

Оператор свертки совершает суръективное отображение вещественной прямой на окружность единичного радиуса и отражает свойство приемной аппаратуры измерять лишь главное значение фазы электромагнитного сигнала. Этот оператор является нелинейным, но обладает следующими важными свойствами:

$$Wr[Wr[\psi]] = Wr[\psi],\ \forall \psi \in \mathbb{R}; \qquad (8)$$

$$Wr[-\psi] = -Wr[\psi],\ \forall \psi \in \mathbb{R}; \qquad (9)$$

$$Wr[Wr[\psi_1] + Wr[\psi_2]] = Wr[\psi_1 + \psi_2],\ \forall \psi_1, \psi_2 \in \mathbb{R}; \qquad (10)$$

$$\nabla\psi = Wr[\nabla Wr[\psi]],\ |\nabla\psi| < \pi,\ \psi \in \mathbb{R}; \qquad (11)$$

$$\nabla\psi = Wr[\nabla Wr[\psi]] + 2\pi\vec{k},\ \forall \psi \in \mathbb{R}; \qquad (12)$$

где ∇ – набла-оператор, $\vec{k} = \vec{k}(x, y)$ – поле вектора с целочисленными компонентами.

Из определений абсолютной фазы, относительной фазы и оператора свертки, следует справедливость следующих соотношений для значений абсолютной фазы ψ и относительной фазы φ:

$$\psi = \varphi + 2\pi c\ ,\ c \in \mathbb{Z}\ , \tag{13}$$

$$Wr[\psi] = \varphi\ . \tag{14}$$

Если на искомое поле абсолютной фазы не наложено никаких дополнительных ограничений задача развертки фазы является некорректно поставленной, в силу отсутствия единственности решения. В качестве дополнительных ограничений на точки поля абсолютной фазы должны быть наложены внутренние связи. Обычно предполагается гладкость искомого поля абсолютной фазы, в форме условия Найквиста-Котельникова – всюду в поле абсолютной фазы модуль градиента абсолютной фазы не превышает π радиан:

$$|\nabla\psi| < \pi\ . \tag{15}$$

Из справедливости соотношений (11), (14), (15) вытекает справедливость соотношения:

$$\nabla\psi = Wr[\nabla\varphi]\ ,\ |\nabla\psi| < \pi\ . \tag{16}$$

Если модель наблюдений не содержит шума и выполнено условие Найквиста-Котельникова, то постановка задачи развертки фазы имеет следующий вид:

$$Wr[\psi(x, y)] = \varphi(x, y)\ , \tag{17}$$

$$|\nabla\psi(x, y)| < \pi\ ,\quad \psi(x_0, y_0) = \varphi(x_0, y_0)\ ,\ (x_0, y_0), (x, y) \in \Omega \subset \mathbb{R}^2\ .$$

Решение задачи (17) существует, единственно, и может быть легко найдено. С учетом соотношения (16) задача (17) может быть записана в эквивалентной форме:

$$\nabla\psi(x, y) = \vec{s}(x, y)\ , \tag{18}$$

$$\vec{s}(x, y) = Wr[\nabla\varphi(x, y)]\ , \tag{19}$$

$$|\nabla\psi(x, y)| < \pi\ ,\quad \psi(x_0, y_0) = \varphi(x_0, y_0)\ ,\ (x_0, y_0), (x, y) \in \Omega \subset \mathbb{R}^2\ . \tag{20}$$

Постановка задачи в форме (18) – (20) на практике более удобна, поскольку содержит намек на простой метод решения. Сначала по известному полю Φ относительной фазы вычисляется так называемое векторное поле $\vec{S}$ фазового квазиградиента, определяемое формулой

(19). Затем искомое поле Ψ абсолютной фазы вычисляется интегрированием векторного поля $\vec{S}$ с учетом начального условия (20).

Наличие шума в модели наблюдений и (или) возможное нарушение условия Найквиста-Котельникова в некоторых точках поля абсолютной фазы, приводят к необходимости решать задачу развертки фазы в более сложной постановке:

$$Wr\left[\psi(x,y)+\eta(x,y)\right]=\varphi(x,y), \tag{21}$$

$$\psi(x_0,y_0)=\varphi(x_0,y_0), \qquad (x_0,y_0),(x,y)\in\Omega\subset\mathbb{R}^2,$$

где $\eta(x,y)$ – аддитивный фазовый шум. Решение задачи (21) не является единственным, что означает некорректность ее постановки.

4. Некорректность постановки задачи развертки фазы. Задача развертки фазы заключается в реконструкции фазового рельефа по данным наблюдений. Даже в идеальном случае отсутствия шума и ошибок измерений, объем информации заключенный в исходных данных задачи недостаточен для получения однозначного решения. Поэтому, задача развертки фазы является обратной некорректно поставленной. Перейдем теперь к строгим формулировкам.

На основании постановки задачи развертки фазы в форме (21) получим постановку в терминах полей фазового градиента, и проанализируем задачу на устойчивость. Мы будем предполагать, что векторные поля фазового квазиградиента и градиента абсолютной фазы являются кусочно-непрерывными. Согласно определению, значение фазового квазиградиента по модулю не может превосходить π радиан. Считается также, что значение абсолютной фазы почти всюду не превосходит по модулю π.

Обозначим символом S пространство векторных полей фазового квазиградиента, а через символ U – пространство векторных полей градиента абсолютной фазы, заданных на компактном множестве Ω. Расстояния между элементами в этих пространствах определим согласно равномерной метрике:

$$\rho_S(\vec{s}_1,\vec{s}_2)=\max_{\Omega}\left|\vec{s}_1-\vec{s}_2\right|,\ \vec{s}_1,\vec{s}_2\in S, \tag{22}$$

$$\rho_U(\vec{u}_1,\vec{u}_2)=\max_{\Omega}\left|\vec{u}_1-\vec{u}_2\right|,\ \vec{u}_1,\vec{u}_2\in U. \tag{23}$$

Равномерная метрика является здесь естественной, поскольку она эквивалентна евклидовой метрике в конечномерном пространстве (данные наблюдений представлены в дискретном виде).

Обозначим символом A оператор, действующий из пространства решений U в пространство исходных данных S:

$$A:\ U\to S. \tag{24}$$

Исходя из постановки задачи (21), используя свойства (8) – (12) оператора свертки, получим явное выражение для оператора

$$A: Wr\left[\psi+\eta\right]=\varphi\,, \tag{25}$$

$$Wr\left[\nabla Wr\left[\psi+\eta\right]\right]=Wr\left[\nabla\varphi\right], \tag{26}$$

$$\nabla\left(\psi+\eta\right)-2\pi\vec{k}=\vec{s}\,, \tag{27}$$

$$Wr\left[\nabla\left(\psi+\eta\right)-2\pi\vec{k}\right]=Wr\left[\vec{s}\right], \tag{28}$$

$$Wr\left[Wr\left[\nabla\left(\psi+\eta\right)\right]+Wr\left[-2\pi\vec{k}\right]\right]=\vec{s}\,, \tag{29}$$

$$Wr\left[\nabla\left(\psi+\eta\right)\right]=\vec{s}\,. \tag{30}$$

Отображение векторного поля $\overline{u}\in U$ в векторное поле $\overline{s}\in S$ оператором A, производится покомпонентно. Для любой компоненты $\vec{u}$ векторного поля $\forall\overline{u}\in U$, отображение, осуществляемое оператором A, имеет следующий вид:

$$a\left(\vec{u}\right)=Wr\left[\vec{u}+\vec{\zeta}\right], \tag{31}$$

где ζ – потенциальное векторное поле аддитивного шума.

В терминах полей фазового градиента, постановка задачи развертки фазы имеет следующий вид:

найти решение $\overline{u}\in U$ по исходным данным $\overline{s}\in S$, при условии:

$$A\left[\overline{u}\right]=\overline{s} \tag{32}$$

Нелинейные свойства оператора свертки обуславливают неустойчивость решения как прямой (вычисление поля $\overline{s}\in S$ по известному полю $\overline{u}\in U$), так и обратной задачи (поиск поля $\overline{u}\in U$ по известному полю $\overline{s}\in S$). Сначала покажем неустойчивость решения прямой задачи. Пусть для компонент векторных полей $\overline{u}_1,\overline{u}_2,U$ всюду на множестве Ω справедливы представления:

$$\vec{u}_1=\vec{u}_2=\left(\pi-\varepsilon\right)\vec{i}\,,\qquad \varepsilon\in\mathbb{R}\,, \tag{33}$$

$$\vec{\zeta}_1=\vec{0}\,,\quad \vec{\zeta}_2\left(\omega_0\right)=\zeta_{2X}\vec{i}\,,\qquad \left|\zeta_{2X}\right|<2\varepsilon\,. \tag{34}$$

здесь ε – некоторое малое действительное число, $\vec{i}$ – орт декартовой системы координат. Если $\Omega_E=\left\{\omega_0\in\Omega:\ \zeta_{2X}>\varepsilon\right\}\neq\varnothing$, то получаем:

$$\rho_U\left(\overline{u}_1,\overline{u}_2\right)=0\,, \tag{35}$$

$$\rho_S\left(\overline{s}_1,\overline{s}_2\right)>2\left(\pi-\varepsilon\right). \tag{36}$$

Выражения (35) – (36) означают неустойчивость в равномерной метрике операции формирования исходных данных модели (31).

Неустойчивость решения задачи (32) в равномерной метрике имеет место только в искусственном случае наличия замкнутой кривой разрыва (нарушения условия Найквиста-Котельникова) абсолютной фазы на множестве Ω. Действительно, пусть справедливы допущения:

$$\vec{u}_1(\omega) = \vec{u}_2(\omega), \quad \omega \in \Omega / \Gamma; \tag{37}$$

$$\vec{u}_1(\omega) = \vec{u}_2(\omega) + 2\pi\vec{k}, \quad \omega \in \Gamma. \tag{38}$$

Тогда

$$\rho_U(\vec{u}_1, \vec{u}_2) = 2\pi\left|\vec{k}\right|. \tag{39}$$

В предположении отсутствия шума, имеем:

$$\rho_S(\vec{s}_1, \vec{s}_2) = 0. \tag{40}$$

Выражения (39), (40) означают неустойчивость в равномерной метрике решения задачи (32) в рассматриваемом случае.

Так как случай неустойчивости решения обратной задачи на практике встречается редко, основное внимание далее уделяется обеспечению единственности решения.

5. Регуляризация постановки задачи развертки фазы. Запишем сначала постановку задачи развертки фазы в форме, не содержащей оператора свертки. Применяя к обеим частям равенства (21) сложный оператор $(Wr * \nabla)[\cdot]$, с учетом свойства (12) имеем:

$$Wr\left[\nabla Wr\left[\psi + \eta\right]\right] = Wr\left[\nabla\varphi\right], \tag{41}$$

$$\nabla(\psi + \eta) - 2\pi\vec{k} = \vec{s}, \tag{42}$$

$$\nabla\psi = \vec{s} + 2\pi\vec{k} - \nabla\eta. \tag{43}$$

Вводя обозначение $\vec{a}(x, y) = 2\pi\vec{k} - \nabla\eta$, приходим к следующей постановке задачи развертки фазы:

$$\nabla\psi(x, y) = \vec{s}(x, y) + \vec{a}(x, y), \tag{44}$$

$$\nabla \times \left[\vec{s}(x, y) + \vec{a}(x, y)\right] = \vec{0}, \tag{45}$$

$$\vec{s}(x, y) = Wr\left[\nabla\varphi(x, y)\right], \tag{46}$$

$$\psi(x_0, y_0) = \varphi(x_0, y_0), \quad (x_0, y_0), (x, y) \in \Omega \subset \mathbb{R}^2. \tag{47}$$

Преобразования (41) – (43) привели к расширению множества решений: любое решение задачи (21) является решением задачи (44) – (47), обратное утверждение не верно. Но так как задача (21) имеет бесконечное множество решений, такое расширение в сущности ничего не меняет.

Для обеспечения единственности решения, задача (44) – (47) подвергается некоторой регуляризации. Согласно методу вариационной регуляризации Тихонова [1], обеспечение единственности решения достигается путем введения в постановку задачи специального функционала, определенного на множестве допустимых решений и независящего от исходных данных.

Различные методы развертки фазы вводят регуляризирующие функционалы, требующие либо экстремальности некоторого свойства добавочного поля, либо экстремальности некоторого свойства (как правило, гладкости) искомого поля абсолютной фазы, либо и того и другого одновременно. Методы, использующие байесовский подход, строят регуляризирующий функционал с учетом имеющейся априорной информации. В этом случае, регуляризирующий функционал имеет смысл апостериорной вероятности искомого решения, взятой с противоположным знаком.

Вводя в постановку задачи (44) – (47) регуляризирующий функционал, приходим к корректной математической постановке задачи развертки фазы:

$$\Phi\left[\vec{s}\left(x,y\right),\vec{a}\left(x,y\right)\right]\to\min, \tag{48}$$

$$\nabla\times\left[\vec{s}\left(x,y\right)+\vec{a}\left(x,y\right)\right]=\vec{0}, \tag{49}$$

$$\vec{s}\left(x,y\right)=Wr\left[\nabla\varphi\left(x,y\right)\right], \tag{50}$$

$$\nabla\psi\left(x,y\right)=\vec{s}\left(x,y\right)+\vec{a}\left(x,y\right), \tag{51}$$

$$\psi\left(x_0,y_0\right)=\varphi\left(x_0,y_0\right),\qquad (x_0,y_0),(x,y)\in\Omega\subset\mathbb{R}^2. \tag{52}$$

Здесь $\Phi\left[\cdot\right]$ – регуляризирующий функционал, $Wr\left[\cdot\right]$ – оператор свертки по модулю 2π радиан, $\varphi\left(x,y\right)$ – заданное скалярное поле относительной фазы, $\psi\left(x,y\right)$ – искомое скалярное поле абсолютной фазы, $\vec{a}\left(x,y\right)$ – неизвестное добавочное векторное поле, Ω – замкнутое ограниченное множество.

Задача (48) – (52) распадается на две независимые задачи: (48) – (50) и (51) – (52). Решение второй задачи не вызывает затруднений. Первая задача есть задача условной оптимизации нелинейного регуляризирующего функционала (48) при системе линейных ограничений типа равенств (49).

6. Методы решения задачи развертки фазы. Существует множество методов решения задачи развертки фазы, большинство из которых не имеет строгого обоснования и построено на эвристических

соображениях. Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки. На практике, выбирается такой метод, который обеспечивает наиболее высокую точность решения задачи при заданных требованиях к памяти ЭВМ и времени поиска решения.

Общепринятой является классификация методов развертки по характеру работы с полем относительной фазы на локальные и глобальные методы. Глобальные методы работают сразу со всеми значениями массива относительной фазы. Локальные методы для формирования оценки абсолютной фазы в данной точке используют лишь значения относительной фазы лежащие в окрестности этой точки.

В данной работе предлагается методы решения задачи развертки фазы классифицировать по типу применяемой регуляризации, разделяя их на три класса.

Первый класс содержит методы предполагающие поиск добавочного векторного поля $\vec{a}(x, y)$, суперпозиция которого с векторным полем фазового квазиградиента $\vec{s}(x, y)$ дает потенциальное векторное поле. Для обеспечения единственности решения требуется доставить минимум некоторому регуляризирующему функционалу $\Phi[\cdot]$ на множестве допустимых решений задачи.

Второй класс составляют методы предполагающие проведение в векторном поле фазового квазиградиента $\vec{s}(x, y)$ системы разрезов, предотвращающей обход контуром интегрирования группы сингулярных точек с отличной от нуля алгебраической суммой фазовых остатков. Для обеспечения единственности решения здесь также требуется доставить минимум некоторому функционалу $\Phi[\cdot]$ на множестве допустимых решений задачи.

Третий класс состоит из методов предполагающих осреднение результата интегрирования в векторном поле фазового квазиградиента $\vec{s}(x, y)$ по некоторому множеству путей.

7. Метод оптимальной регуляризации. Будем исходить из регуляризованной постановки задачи (48) – (52) реконструкции фазового рельефа. Поскольку модель формирования наблюдений имеет случайную составляющую, поставленную задачу удобно рассматривать в рамках математической статистики. Метод оптимальной регуляризации будем строить на основе байесовского подхода (Рис. 2), так как это позволяет естественным образом включить в постановку задачи всю имеющуюся априорную информацию.

Формирование вероятностно-статистической модели (апостериорного распределения вероятностей решения) по имеющейся априор-

ной информации сводится к статистическому оцениванию неизвестных параметров. Функционал апостериорной вероятности, построенный на основании имеющейся априорной информации, подставим в постановку задачи развертки фазы в качестве регуляризирующего функционала.

После получения апостериорного распределения вероятностей будем проводить байесовскую фильтрацию исходных данных задачи, чтобы облегчить проведение последующих этапов метода.

Точка, в которой ротор векторного поля фазового квазиградиента отличен от нуля, называется сингулярной. Ненулевая циркуляция векторного поля фазового квазиградиента по замкнутому контуру, охватывающему эту точку, называется фазовым остатком. Наличие сингулярных точек в поле фазового квазиградиента является следствием наличия разрывов первого рода в скалярном поле относительной фазы. Появление разрывов фазы, в свою очередь, связано с технологией съемки и (или) геометрией подстилающей поверхности.

Ключевой идеей предлагаемого метода является идея классификации сингулярных точек по природе происхождения на два класса – шумовые и геометрические. Геометрические сингулярные точки вызваны реальными разрывами абсолютной фазы, в то время как шумовые сингулярные точки обусловлены действием шума. Результаты классификации сингулярных точек дают возможность применять к каждому классу сингулярных точек индивидуальную, оптимальную для этого класса, регуляризацию. Для сингулярных точек геометрической природы (то есть, сингулярностей обусловленных обратным наклоном и (или) недостаточной частотой дискретизации) будем формировать систему разрезов, используя сведение к задаче поиска потока минимальной стоимости [2]. Причем массив стоимостей протекания будем формировать в соответствии с построенной вероятностно-статистической моделью. Для сингулярных точек шумовой природы будем проводить фильтрацию остаточного шума оптимальную в смысле максимума апостериорной вероятности.

После проведения оптимальной, в указанном выше смысле, регуляризации, решение задачи восстановления фазового рельефа дает простое интегрирование регуляризованного фазового градиента.

8. Тестирование предложенного подхода. Предложенный метод оптимальной регуляризации был реализован в среде программирования visual C++ 6.0. Задача развертки фазы была решена с помощью предложенного метода на тестовых радиолокационных данных. На использовавшемся тестовом примере, предложенный метод показал самую высокую точность решения задачи (см. табл. 1).

Табл. 1

Метод развертки фазы	*Средняя ошибка по высоте, м.*
– наименьших квадратов	145.2
– растущих пикселей	208.2
– оптимизации сетевого потока	59.4
– функций Грина	107.2
– оптимальной регуляризации	49.4

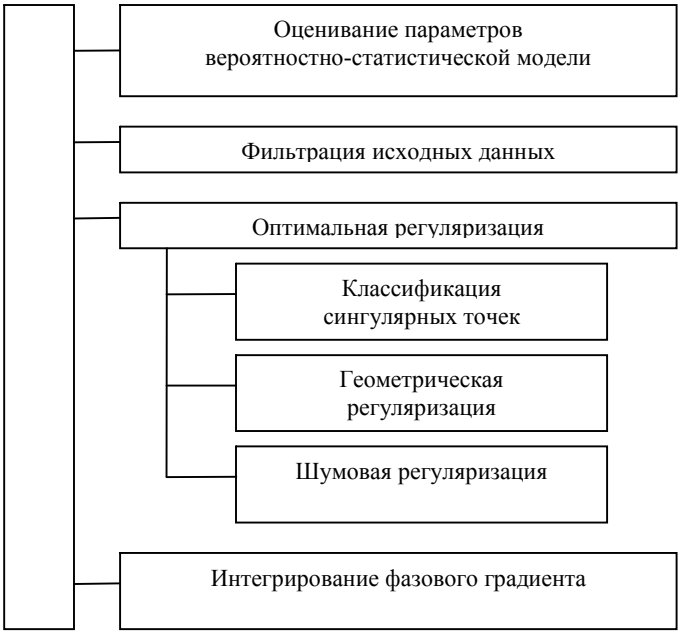


Рис. 2. Блок-схема метода оптимальной регуляризации, построенного на основе байесовского подхода.

Необходимо отметить, что точность предложенного метода оптимальной регуляризации во многом определяется правильностью проведения этапа классификации сингулярных точек.

9. Заключение. В работе дана общая математическая постановка задачи развертки фазы, и показана ее некорректность. Приведена

обобщенная регуляризованная постановка задачи развертки фазы. Предложена классификация методов развертки фазы по типу применяемой регуляризации. Разработан новый метод решения задачи развертки фазы на основе байесовского подхода. Представлены результаты экспериментальной проверки точности предложенного метода.

Будущие исследования целесообразно посвятить оптимизации предложенного метода по времени поиска решения и требованиям к памяти ЭВМ, поскольку в существующем виде он является самым ресурсоемким.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. Методы решения некорректных задач. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979.
2. C. W. Chen “Statistical-cost network-flow approaches to two-dimensional phase unwrapping for radar interferometry”, PhD thesis, Stanford University, 2001.

УДК 621.397

О.Ю.Ерёмин

НОРМАЛИЗАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ АЭРОФОТОСЪЕМКИ

Процесс распознавания изображений, полученных в результате аэрофотосъемки, носит комплексный характер и является многоэтапной процедурой. Все этапы обработки тесно связаны друг с другом, и качество выполнения каждого этапа влияет на остальные. Предложенное в [1] использование модели ART (ART1 и ART2) требует высокопроизводительной архитектуры для решения задачи распознавания, поскольку ёмкость нейронной сети ограничена. Следовательно, необходимо создавать новые категории для эталонных изображений.

Существует два подхода для преодоления этой проблемы: 1. Высокопроизводительные архитектуры на основе кластерных систем. 2. Методы, позволяющих более четко выделять категории эталонов, за счет чего будет уменьшено количество категорий в нейронной сети. Первый подход определяется высокой стоимостью. Второй – предполагает введение дополнительных этапов обработки изображений (помимо предобработки, сегментации и фильтрации), которые будут предшествовать этапу распознавания.

Предполагается ввести этап нормализации изображений. На этом этапе будет производиться преобразование изображения к такому виду, что оно будет находиться ближе к своему эталону и за счет этого можно ограничить порождение новых категорий. Также этот этап позволит разделить элементы изображения, которые будут распознаваться отдельно: цвет, текстура, форма.

Нормализация заключается в вычислении параметров преобразований, которым подвергнуты входные изображения, а затем в приведении изображений к виду, близкому к эталонному. В [2] рассмотрены параллельные и последовательные, параметрические и следящие нормализаторы, которые могут эффективно использоваться для смещений, поворотов, растяжений, косых сдвигов и некоторых их комбинаций.

В результате введения этапа, на котором проводится нормализации изображений, ожидается повышение эффективности процесса распознавания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ерёмин О.Ю. Распознавание изображений, полученных в результате аэрофотосъемки, с. 251. Тезисы докладов. — М.: МИЭМ, 2007. – 469 с.
2. Путятин Е.П., Аверин С.И. Обработка изображений в робототехнике. М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.