

Министерство образования и науки РФ  
Российская академия ракетных и артиллерийских наук  
Национальный комитет по тепломассообмену РАН  
Балтийский государственный технический университет «Военмех»  
Секция «Боеприпасы и спецхимия» НТС ГК «Ростехнологии»  
ФГУП «ГНПП «Сплав»  
ФГУП «ФНПЦ «Прибор»  
Испытательный полигон «Ржевка» ВМФ МО РФ

## ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

III Всероссийская  
научно-техническая конференция  
Санкт-Петербург, 2 июля – 6 июля 2012

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ  
В двух томах  
Том II

Санкт-Петербург  
2012

УДК 531.5+623.5

Ф94

**Ф94** **Фундаментальные** основы баллистического проектирования: III Всероссийская научно-техническая конференция. Санкт-Петербург, 2 июля – 6 июля 2012 г.: Сборник материалов. В 2 т. Т.2 / Под ред. Б.Э. Кэрта; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2012. – 224 с.  
ISBN 978-5-85546-701-7

Публикуются материалы докладов, представленных на Третью Всероссийскую научно-техническую конференцию «Фундаментальные основы баллистического проектирования» (г. Санкт-Петербург, 2 июля – 6 июля 2012г.). Рассматриваются проблемы связанные с проектированием современных средств поражения и боеприпасов, включая внутреннюю, внешнюю и конечную баллистику, динамику процессов выстрела и старта, прочность конструкций, эффективность действия, принципы работы информационных, управляющих и иницирующих систем, компьютерные технологии и средства проектирования, технологии производства, хранения и утилизации.

**УДК 531.5+623.5**

*Публикуется в авторской редакции.*

**ISBN 978-5-85546-701-7**

© БГТУ, 2012  
© ООО «УНПЦ Комтех», 2012  
© Авторы, 2012

## Традиционные участники конференции

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова; Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана; Тульский государственный университет; Национальный Исследовательский Томский Политехнический университет; Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники; Институт автоматизации проектирования РАН; Институт проблем механики РАН; Институт проблем химической физики РАН; Институт химической физики РАН им. Н.Н.Семенова; Институт механики МГУ; Институт математики, экономики и информатики Иркутского госуниверситета; Российский федеральный ядерный центр – ВНИИ экспериментальной физики; Российский федеральный ядерный центр – ВНИИ технической физики; НИИ механики ННГУ; НИИ прикладной математики и механики при Томском госуниверситете; ЗАО «Специальное конструкторское бюро»; ОАО ФНПЦ «Научно-исследовательский институт прикладной химии»; ОАО «ЦНИИ «Буревестник»; ОАО «ЦНИИ специального машиностроения»; ФГУП «Государственное научно - производственное предприятие «СПЛАВ»; ФГУП ГНЦ РФ «ЦНИИ имени академика А.Н.Крылова; ФГУП «КБ Машиностроения»; ОАО «КБ Приборостроения»; ФГУП "Конструкторское бюро точного машиностроения имени А.Э. Нудельмана"; ФКП Нижнетагильский институт испытания металлов; ФГУП «НИИ полимерных материалов»; ФГУП "ФНПЦ "Прибор"; ФГУП Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н. Е. Жуковского; Научно-образовательный центр систем вооружений БГТУ "Военмех"; ООО «Учебно-научно-производственный центр компьютерных технологий».

## Президиум - научный комитет конференции

В.А. Авенян, В.Г. Баженов, А.А. Берлин, В.М.Буренок, А.В. Вагин, Н.М. Вареных, В.И. Волчихин, В.С. Вишневецкий, Г.А. Денежкин, К.С. Дубов, С.В. Еремин, А.В. Забродин, Ю.В. Загашвили, Г.И. Закаменных, В.В. Зеленцов, В.М. Кашин, В.Е.Костюков, Ю.А. Круглов, В.М. Крылов, А.И. Леонтьев, А.М. Липанов, Л.Н. Лысенко, Н.А. Макаровец, Ю.М. Милехин, Ю.М. Михайлов, Г.М. Муратшин, Ю.И. Набоков, Ю.М. Окунев, В.В. Панов, В.М. Пашин, В.А. Петров, Н.А. Платонов, Ю.В. Полежаев, Р.Ш. Рахматуллин, В.Л. Руденко, А.Л. Рыбас, Г.Н. Рыкованов, В.А. Садовничий, М.К. Сапего, В.В. Селиванов, М.В. Сильников, И.М. Смирнов, В.С. Соловьев, И.В. Степаничев, В.В. Степанов, О.А. Толпегин, Ю.И. Файков, Ю.В. Фролов, А.С.Холодов, Г.Г. Черный, Б.Н. Четверушкин, О.Т. Чижевский, А.Н. Чуков, А.С. Шалыгин, А.Г. Шипунов

**Сопредседатели конференции**

**В.В. Бобрус**

**К.М. Иванов**

**Б.Э. Кэрт**

**Н.А. Макаровец**

**О.Т. Чижевский**

**Программный комитет конференции**

О.Г. Агошков, А.В. Алиев, И.Г. Ассовский, А.В. Белов,  
В.А. Бородавкин, Ваулин С.Д., Ю.А. Виноградов, В.А. Велданов,  
С.В. Гувернюк, Л.С. Егоренков, В.Н. Емельянов, Р.У. Есиев,  
В.Ф. Захаренков, С.А. Исаев, А.Н. Ищенко, А.А. Каширкин,  
Е.А. Козлов, В.И. Козлов, Б.Э. Кэрт, С.В. Ладов, Б.И. Ларионов,  
Ф.А. Максимов, В.Ю. Мелешко, В.А. Могилев, Н.В. Могильников,  
Н.А. Остапенко, Г.Я. Павловец, Е.Н. Петров, Н.Н. Пилюгин,  
В.А. Пинчук, Е.П. Поляков, В.А. Самсонов, Е.Н. Семашкин,  
Г.А. Тирский, Е.А. Хмельников, И.Е. Хорев, Ю.С. Швыкин,  
Ю.Д. Шевелев, А.А. Шишков, Д.А. Ягодников

**Оргкомитет конференции**

*Кэрт Борис Эвальдович (председатель)*, Знаменский Евгений  
Александрович (*ученый секретарь*), Петрова Елена Владиславовна  
(*секретарь*), М.Я. Водопьянов, Ю.В. Генкин, Ю.А. Виноградов,  
И.В. Князева, И.С. Максимов, Ф.А. Максимов, Е.А. Хмельников

### **Спонсоры конференции**

БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова;  
    ЗАО «НПО «СОПОТ»  
ОАО «Конструкторское бюро приборостроения»;  
ОАО «ФНПЦ НИИ Прикладной Химии»;  
    ОАО ЛМЗ им. К.Либкнехта;  
    ОАО «НИИИ»;  
ОАО «НИИ Точной механики»;  
    ОАО «НПП «Старт»;  
    ООО «УНПЦ Комтех»  
    ФГУП «ГНПП «Сплав»;  
    ФГУП «ФНПЦ «Прибор»;  
ФГУП ГНЦ РФ «ЦНИИ имени академика А.Н.Крылова»;  
    ФГУП «КБ «Арсенал»;  
ФГУП «Конструкторское бюро машиностроения»;  
    ФГУП «РФЯЦ –ВНИИЭФ»;  
    ФГУП «ФЦДТ «Союз»  
    ФКП «НИИ «Геодезия»;  
    ФКП НТИИМ;  
    Фонд «ВОЕНМЕХ»

### **Попечительский Совет конференции**

**К.М. Иванов**, ректор БГТУ «Военмех»; **Г.Н. Куприн**, ген. директор ЗАО «НПО «СОПОТ»; **И.В. Степаничев**, ген. директор ОАО «КБ Приборостроения»; **Н.М. Вареных**, ген. директор ОАО ФНПЦ «Научно-исследовательский институт прикладной химии»; **Ю.А. Набоков**, временный генеральный директор ОАО ЛМЗ им. К.Либкнехта; **И.М. Смирнов**, ген. директор ОАО «НИИИ»; **К.С. Дубов**, ген. директор ОАО «НИИ Точной механики»; **Г.М. Муратшин**, ген. директор ОАО НПП «Старт»; **Н.А. Макаровец**, ген. директор и ген. конструктор ФГУП «ГНПП «Сплав»; **О.Т. Чижевский**, ген. директор и ген. конструктор ФГУП «ФНПЦ «Прибор»; **В.М. Пашин**, научный руководитель-первый заместитель ген. директора ФГУП ГНЦ РФ «ЦНИИ имени академика А.Н.Крылова; Сапего М.К., генеральный директор - генеральный конструктор ФГУП «КБ «Арсенал»; **В.М. Кашин**, ген. директор и ген. конструктор ФГУП «КБМ»; **В.Е. Костюков**, директор ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»; **Ю.М. Милехин**, ген. директор ФГУП «ФЦДТ «Союз»; **А.В. Вагин**, ген. директор ФКП «НИИ «Геодезия»; **В.Л. Руденко**, ген.директор ФКП НТИИМ; **Б.Э. Кэрт**, ген. директор ООО «УНПЦ Комтех»; **Е.Н. Никулин**, президент Санкт-Петербургского фонда поддержки образования, науки и техники «ВОЕНМЕХ»;

*Посвящается 80-летию  
со дня образования  
БГТУ «ВОЕНМЕХ»*

## **ПРЕДИСЛОВИЕ**

Всероссийская научно - техническая конференция "Фундаментальные основы баллистического проектирования" организована как естественное продолжение и развитие конференций баллистической направленности, проводящихся в БГТУ «Военмех» начиная с 1997 г. (I - III Окуневские чтения (1997, 2000, 2002 гг.), Проблемы баллистики (2004., 2006 гг.)). Результаты этих конференций, поддержанных широким кругом учебных, научных и промышленных организаций опубликованы в 18 томах материалов докладов и трудов, изданных Оргкомитетом. С развитием учебно – научной деятельности БГТУ выявилась необходимость приблизить содержание конференций к проблематике, связанной с разработкой фундаментальных основ баллистического проектирования систем вооружений и боеприпасов. С этой целью был видоизменен формат конференции. Первая и вторая конференции были проведены в 2008 г. и 2010 г. в БГТУ «Военмех» им. Д.Ф.Устинова на базе Института систем вооружений кафедрой ЕЗ «Средства поражения и боеприпасы» при поддержке традиционных и ряда новых участников. Конференция проводится под эгидой Министерства науки и образования РФ, Российской академии наук (Национальный комитет по тепломассообмену РАН), Российской академии ракетных и артиллерийских наук. Было издано 7 томов материалов докладов и трудов конференции.

Основной целью конференции является реализация потребности научного общения ученых разных поколений, представляющих основные научные центры России – академические и отраслевые институты, университеты, проектные и промышленные организации.

Третья конференция посвящена восьмидесятилетию со дня основания «Военмеха» и кафедры «Средства поражения и боеприпасы».

Добро пожаловать в Санкт-Петербург! Приглашаем принять участие в работе конференции.

Председатель оргкомитета конференции  
Д.т.н., профессор Б.Э.Кэрт

Фундаментальные основы баллистического проектирования  
2012

Секция 7

Проблемы создания боеприпасов  
повышенной стойкости к  
внешним воздействиям



## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ ЭФФЕКТИВНЫХ ПУТЕЙ СНИЖЕНИЯ РАЗГАРНО-ЭРОЗИОННОГО ДЕЙСТВИЯ ПОРОХОВЫХ ГАЗОВ

**Н.Г. ИБРАГИМОВ, Э.Н. ИБРАГИМОВ, А.А. ФИЛИППОВ**

ФГУП «Научно-исследовательский институт полимерных материалов»  
614113, г. Пермь, Чистопольская ул. д. 16,  
Факс (342) 283-68-87, 250-11-88 Телефон (342) 282-77-83, 250-12-02  
E-mail: [niipm@pi.ccl.ru](mailto:niipm@pi.ccl.ru)

Решение проблемы снижения разгарно-эрозионного действия (РЭД) существующих и перспективных артиллерийских порохов, а следовательно обеспечение высокой живучести стволов при их использовании является приоритетной задачей конструкторов, разработчиков зарядов и порохов, и специалистов, эксплуатирующих различные артиллерийские системы.

Нами проведены теоретические исследования теплового и химического износа стволов в зависимости от применяемого пороха для существующих отечественных систем. При этом доля механического износа бралась условно постоянной, зависящей от габаритно-массовых характеристик снарядов и заданных баллистических характеристик. При оценке химической составляющей определено, что наибольший вклад в химическую эрозию продуктов сгорания вносят  $H_2$  и  $CO$ . Для обеспечения низкой эрозионной способности необходимо превратить  $H_2$  в  $H_2O$  и  $CO$  в  $CO_2$  или уменьшить их содержание в продуктах сгорания. Это можно сделать за счет повышения кислородного баланса в топливе, однако при этом автоматически увеличивается температура продуктов сгорания, соответственно и канала ствола и скорость износа. Чтобы окислить  $H_2$  и  $CO$  без увеличения температуры пламени, необходимо увеличить содержание  $N_2$ , который является относительно инертным.

Проведена оценка тепловой составляющей. За рубежом разработаны способы математического определения величины износа в зависимости от температуры продуктов сгорания применяемого пороха, баллистических характеристик выстрела и калибра орудия.

Для оценки сопоставимости результатов теоретических и экспериментальных данных по разгарно-эрозионному действию пороховых газов проведены испытания различных составов и существующих приемов снижения износа стволов. Исследованы следующие варианты повышения живучести стволов:

- покрытие внутренней поверхности ствола;
- использование в составе метательного заряда флегматизирующих элементов в виде обкладки, содержащей соединения различных тугоплавких металлов;

- обработка поверхности пороховых элементов флегматизаторами или применение «слоеных» порохов;
- изменение состава пороха:
  - а) введение в состав пороха антиэрозионных добавок (АЭД) в виде тугоплавких окислов различных металлов (соединения титана, молибдена, хрома). Предположительно тугоплавкие добавки, расплавляясь в продуктах сгорания до парообразного конденсата, соприкасаются с более холодной поверхностью ствола и высаживаются на ней, образуя теплозащитный слой и снижая скорость потока пороховых газов;
  - б) применение «холодных» порохов с требуемым уровнем энергетических и баллистических характеристик;
  - в) уменьшение в составе продуктов сгорания агрессивных газов.

Проведенные исследования показали хорошую сходимость теоретических и экспериментальных данных. Наиболее эффективными путями снижения РЭД является покрытие внутренней поверхности ствола и применение «холодных» порохов, но практические возможности этого метода ограничены требованиями системы, в которой применяется состав. Поэтому необходимы комплексные мероприятия конструктивного и рецептурного характера для решения поставленной задачи.

## **ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ И РАЗМЕРА ЧАСТИЦ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ГОРЮЧЕГО И ОКИСЛИТЕЛЯ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СОСТАВАХ НА ИХ ВЗРЫВЧАТЫЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

*А.А. МАТВЕЕВ, В.Н. КУЛИКОВ, А.Н. ОСАВЧУК, Т.А. БЕСТУЖЕВА*  
*Федеральное Государственное Унитарное Предприятие «ФЦДТ «Союз»,*  
*140090, Московская обл., г. Дзержинский, улица. Академика Жукова, д.42,*  
*тел./факс (495) 551-73-29, e-mail - [fcdt@monnet.ru](mailto:fcdt@monnet.ru)*

Исследование взрывчатых и энергетических характеристик многокомпонентных систем, состоящих из взрывчатого вещества (ВВ), металлического горючего, окислителя и полимерного связующего, представляет интерес в связи с разработкой рецептур и оценкой возможности использования подобных мощных взрывчатых составов (ВС) в различных средствах поражения [1-5]. При этом они должны быть малочувствительными к внешним воздействиям (механическим, тепловым, ударно-волновым и т.п.), чтобы обеспечить

взрывобезопасность их производства и эксплуатации. В данной работе (в продолжение [6,7]) приведены экспериментально-расчетные результаты исследований по оценке влияния на взрывчатые и энергетические характеристики модельных образцов ВС содержания и размера частиц металлического горючего и окислителя.

**Экспериментальные исследования** по определению взрывчатых свойств образцов ВС проводили по стандартным методам. Скорость детонации ( $D$ ) регистрировали на отвержденном заряде диаметром 40 мм длиной  $\approx 300$  мм с помощью непрерывной фотографии распространения процесса. Эффективность дробящего действия оценивали по методике [3] на основании количественных характеристик осколочных масс:

- по числам осколков с массой  $m > 0,25$  г ( $N_{0,25}$ ), 0,5 г ( $N_{0,5}$ ) и 1,0 г ( $N_{1,0}$ ) и по относительному содержанию мелкой ( $m \leq 1$  г), средней ( $1 \text{ г} < m \leq 4$  г) и крупной ( $m > 4$  г) фракции осколков ( $\mu_m, \mu_c, \mu_k$ , соответственно).

**Теоретические исследования** проводили по термодинамической методике МГТУ им. Э.Н. Баумана [3] в рамках модели идеальной детонации Чепмена-Жуге (Ч-Ж). Расчет скорости детонации ( $D_{C-J}$ ), теплоты взрыва ( $Q_D$ ) и ( $Q_F$ ) а также полной идеальной работы ( $A_{id}$ ) расширения продуктов взрыва (ПД) выполнен в предположении режима идеальной детонации с полным химическим и тепловым равновесием в ПД.  $Q_D$  – детонационная теплота при давлении ПД в точке Ч-Ж,  $Q_F$  – фугасная теплота на изоэнтропе расширения ПД до давления  $\approx 0,1$  МПа.

Были исследованы несколько (четыре) групп модельных образцов ВС, которые при содержании связующего в пределах 14...16 % отличались количеством окислителя и металлического горючего – алюминия (Al) за счет ВВ – октогена. В первой и второй изучено влияние массового содержания (10...40 %) алюминиевого порошка (АСД-6) в рецептурах ВС, которые отличались количеством окислителя с размером частиц 160...315 мкм в 5 раз (6 % и 30 %, соответственно). Во второй группе проведены также сравнительные эксперименты по исследованию влияния в составе размера частиц алюминиевого порошка.

Получено, что увеличение содержания окислителя с 6 до 30 % в ВС приводит к незначительному повышению их тепловой и механической чувствительности. При этом максимальные расчетные значения  $Q_D$  и  $Q_F$  и  $A_{id}$  близки между собой, хотя достигаются в разных группах при различном содержании металлического горючего. Фугасная теплота  $Q_F$  и работа  $A_{id}$  (в обеих группах) при этом проходят через максимум при содержании Al  $\approx 30$  %. Значения скоростей детонации  $D$  и  $D_{C-J}$  при одновременном увеличении массового содержания, как окислителя, так и Al снижаются. Причем экспериментальные значения  $D$  для ВС 2-ой группы существенно ниже, чем в 1-ой, однако расчетные  $D_{C-J}$  остаются примерно равными. Замена порошка марки АСД-6 на более

крупный АСД-1 не привела к снижению скорости детонации. С увеличением содержания металла с 20 до 30 % в рецептуре ВС значение  $\mu_c$  уменьшилось на  $\approx 18$  %, а количество осколков  $N_{0,25}$  осталось примерно равным.

В третьей и четвертой – исследовано влияние на взрывчатые и энергетические характеристики ВС содержания окислителя и размера его частиц для двух постоянных количеств Al – 20 и 30 %, соответственно. Получено, что с увеличением содержания окислителя с 6 до 30 %: - экспериментальная скорость детонации  $D$  уменьшается, а расчетная  $D_{с.л}$  практически не изменяется. При увеличении размера частиц окислителя с 50 до 160-315 мкм (при 6 % окислителя)  $D$  несколько уменьшилась, а затем – при 14% возрасла. Увеличение содержания окислителя в ВС приводит также к незначительному повышению их тепловой и механической чувствительности и  $Q_F$ , а осколочная эффективность практически не изменяется.

Из классификационной диаграммы дробления осколочного цилиндра следует, что по основным осколочным характеристикам ( $N_{0,25}$ ,  $\mu_c$ ) дробящее действие исследованных образцов ВС при содержании Al в количестве 20% (при 6 и 30 % окислителя) несколько выше, чем у окфола. С увеличением содержания алюминия до 30 и 40 % более существенно снижается  $\mu_c$ . Предварительные результаты показывают, что с уменьшением размера частиц окислителя до 50 мкм осколочное действие состава несколько ниже, чем в случае с более крупным окислителем.

Критическое давление возбуждения детонации, определенное по методике предприятия, составляет для исследованных образцов ВС  $\approx 20...22$  Кбар, что существенно выше, чем для штатных используемых в средствах поражения ВВ.

### **Выводы**

1. Выполнены комплексные исследования по отработке технологии изготовления, а также по экспериментально-расчетному определению взрывчатых и энергетических характеристик модельных ВС в зависимости от содержания (за счет ВВ) и размера частиц металлического горючего и окислителя.

3. Получено, что увеличение содержания в рецептуре ВС как горючего (до 40 %), так и окислителя (до 30 %) приводит: а) к некоторому повышению их тепловой и механической чувствительности; б) к снижению скорости детонации и дробящего действия, в) к повышению фугасной теплоты  $Q_F$  и работы  $A_{ид}$ .

4. Замена мелкого по размерам частиц Al (АСД-6) на более крупный (АСД-1) не снижает скорость детонации состава. Использование в рецептуре ВС более крупного по размерам частиц окислителя приводит

к повышению его скорости детонации и осколочного действия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Талавар М.Б., Сивабалан Р., Аннияппан М., Горе Г.М., Астана С.Н., Гандхе Б.Р. Новые тенденции в области создания перспективных высокоэнергетических материалов. // Физика горения и взрыва, 2007, т. 43, №1. С. -72-85.

2. Вадхе П.П., Павар Р.Б., Синха Р.К., Астана С.Н., Субхананда Р. Алюминизированные литьевые взрывчатые вещества (обзор) // Физика горения и взрыва, 2008, Т. 44, №4.-С.98-115.

3. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко.- Изд. 3-е, в 2 т. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002

4. Одинцов В.А., Имховик Н.А., Меркулов В.М., Зайчиков Ю.Е., Осавчук А.Н., Куликов В.Н., Якимцев И.В. Осколочно-кинетические боеприпасы с адаптивными зарядами ВВ двойного назначения (на основе баллистических и смесевых ТРТ) // Ударные волны в конденсированных средах: Доклады научной конференции. СПб.: ноябрь 2008. С. 112-120.

5. Меркулов В.М., Куликов В.Н., Осавчук А.Н., Бестужева Т.А., Шикунев Н.В. Перспектива разработки и использования в средствах поражения мощных взрывчатых составов на основе компонентов и технологии твердого ракетного топлива //Сб. материалов Всероссийской научно-технической конференции «Фундаментальные основы баллистического проектирования», Санкт-Петербург, 28 июня-2 июля 2010г., т. II, С.116-120.

6. Осавчук А.Н., Меркулов В.М., Зайчиков Ю.Е., Куликов В.Н., Шишов Н.И., Имховик Н.А., Одинцов В.А. Экспериментально-теоретические исследования взрывчатых свойств, дробящего и метательного действия смесевых составов на основе компонентов твердого ракетного топлива // Горение и взрыв. Вып. 3 / Под ред. С.М. Фролова. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2010. С. 246-253.

7. Милехин Ю.М., Осавчук А.Н., Куликов В.Н., Бестужева Т.А., Одинцов В.А., Имховик Н.А. Влияние содержания компонентов в мощных взрывчатых составах на их взрывчатые и энергетические характеристики // Сборник тезисов докладов на Международной конференции XIII Харитоновские тематические научные чтения, 14-18 марта 2011, г.Саров, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», -С.7-9.

Фундаментальные основы баллистического проектирования  
2012

Секция 8

Методы и средства  
полигонных испытаний и измерений



## **РАСЧЕТ ВНУТРИБАЛЛИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АРТИЛЛЕРИЙСКИХ ЗАРЯДОВ НА ОСНОВЕ МАНОМЕТРИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ**

**М.Н. БЕЛОБОРОДОВ, В.И. БЕЛЯКОВ, Ю.В. ШАЦКИХ**

*ФКП «Научно-исследовательский институт «Геодезия»,*

*141292, Московская обл., г. Красноармейск, пр-т Испытателей, 14*

*т., факс (496) 523-33-92, E-mail: [pyryev@niigeo.ru](mailto:pyryev@niigeo.ru)*

При эксплуатации и хранении артиллерийских порохов и зарядов важно знать насколько изменились их внутрибаллистические характеристики (ВБХ) и способен ли заряд выполнить свою задачу. Лабораторные испытания пороха, оценивающие изменение его физико-химических характеристик по отношению к характеристикам, регламентируемым СТП, позволяют судить о старении заряда и безопасности его эксплуатации.

Соответствие требуемым ВБХ, как правило, производится экспериментально стрельбой из орудий. В данной работе сделана попытка сократить объемы стрельбовых испытаний путем использования дополнительной информации о манометрических испытаниях порохов и зарядов и построения физико-математической модели для расчета ВБХ.

В работе предложен следующий порядок проведения работ по оценке ВБХ. Информация, полученная в результате манометрических испытаний, дает в классическом варианте значения силы пороха и коволюма необходимые для построения точной математической модели расчета ВБХ для конкретного образца заряда. Затем проводится экспериментальная проверка модели с получением реальных ВБХ. Это позволяет рассчитать коэффициенты согласования модели с экспериментом и уточнить модель. Расчет с использованием уточненной модели дает возможность с заданным уровнем вероятности получить ВБХ только на основе манометрических испытаний пороха и принимать решения о продлении гарантийных сроков хранения порохов и зарядов. Данный подход дополняет существующую методологию решения этих вопросов и, не внося кардинальных изменений в процесс оценки гарантийных сроков хранения порохов и зарядов, сокращает количество стрельбовых испытаний, заменяя их расчетами.

## **КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ВЫСОКОТОЧНЫХ БОЕПРИПАСОВ**

**А.В. ВАГИН, М.Н. БЕЛОБОРОДОВ, В.И. БЕЛЯКОВ, В.А. ПЫРЬЕВ**

*ФКП «Научно-исследовательский институт «Геодезия»,  
141292, Московская обл., г. Красноармейск, пр-т Испытателей, 14  
т., факс (496) 523-33-92, E-mail: [pyryev@niigeo.ru](mailto:pyryev@niigeo.ru)*

Важнейшим этапом при разработке и производстве перспективных образцов вооружения и военной техники являются их полигонные испытания. Они являются интегрирующим звеном в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах, фокусирующим весь спектр боеприпасных технологий в целях поиска инновационных решений и создания качественно новых образцов ракетно-артиллерийского вооружения. Именно на этом этапе разработки выявляются инновационные, конструктивные и технологические решения, позволяющие создавать технику, соответствующую заданному Минобороны России уровню требований к современным системам и комплексам вооружения.

В работе показан подход к созданию программно-аппаратного комплекса траекторных измерений. На основе информационных исследований определены требования к технологии баллистических испытаний на базе основных тенденций развития отечественных и зарубежных систем ракетно-артиллерийского вооружения, а также методов и средств обеспечения регистрации и обработки внешнетраекторных параметров, что позволило оптимизировать схему технологии баллистических испытаний.

Описано конструкторско-технологическое решение (КТР) программно-аппаратного комплекса, включая структуру процессов и средств, его составляющих и требования к ним, а также предусматривающее интеграцию процессов измерения внутрибаллистических и внешнебаллистических параметров с использованием существующих, модернизируемых и вновь разрабатываемых средств, в том числе оптико-электронных, обеспечивающих испытания высокоточных артиллерийских и ракетных боеприпасов, имеющих сложную траекторию полета.

На основе предлагаемого к реализации КТР выбрана методология проведения экспериментальных работ, включая использование как имеющихся классических схем, так и перспективных наработок, позволяющих получить необходимый объем дополнительной информации при внешнетраекторных испытаниях высокоточных

боеприпасов. В качестве исходных параметров предусмотрено использование метеоданных радиозондирования атмосферы, данных глобального геопозиционирования для оптимальной топологии эксперимента, расчетных и экспериментальных методов определения начальной скорости.

Экспериментально проверено применение оптико-электронных регистраторов, в том числе высокоскоростных цифровых видеокамер и тепловизоров для регистрации объектов испытаний, а также методов цифровой обработки изображений.

## **РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БАЗЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ СРЕДСТВ ИНЖЕНЕРНОГО ВООРУЖЕНИЯ**

**А.В. ВАГИН, А.В. ВИНОГРАДОВ, А.О. ПИЗАЕВ, М.И. СИДОРОВ**  
*ФКП «Научно-исследовательский институт «Геодезия»,  
141292, Московская обл., г. Красноармейск, пр-т Испытателей, 14  
т. (496) 523-32-61, факс (496) 523-33-92, E-mail: [pyryev@niigeo.ru](mailto:pyryev@niigeo.ru)*

В настоящее время значительная часть средств инженерного вооружения не отвечает современным требованиям по обеспечению мобильности частей и подразделений Вооруженных Сил Российской Федерации (ВС РФ) в условиях массового применения противником минно-взрывных заграждений (МВЗ). Поэтому в настоящее время активно ведутся разработки новых эффективных средств инженерного вооружения для разведки и преодоления МВЗ, основанных на применении в их конструкции инновационных технологий, перспективных материалов и использования новых физических принципов. Вместе с тем их создание должно сопровождаться комплексными испытаниями на всех этапах разработки включая государственные испытания, проводимыми в условиях, максимально приближенным и реальным. В свою очередь большинство полигонов, предназначенных для этих целей, сокращены или же их оснащение не отвечает современным требованиям. Поэтому создание комплексной площадки и сосредоточение испытаний различных средств на единой полигонной базе оправдано и экономически эффективно. Это позволит сократить сроки разработки и принятия на вооружение перспективных образцов и снизить затраты на транспортировку их опытных и экспериментальных образцов, содержание полигонов, а также на организацию и проведение испытаний.

В ФКП «НИИ «Геодезия» проведен анализ способов и методов испытаний средств разведки и преодоления МВЗ, обнаружения взрывоопасных предметов (ВОП), содержащих взрывчатые материалы (ВМ), их обезвреживания и ликвидации, а также направлений развития групп данных средств. По его результатам сформулированы основные требования к перспективной испытательной базе, методическому и аппаратному её оснащению, технологии комплексных испытаний средств обнаружения, обезвреживания и ликвидации, основными из которых являются:

- создание единого испытательного комплекса, оснащенного для всесторонних экспериментальных исследований средств разведки и преодоления МВЗ, обнаружения ВОП, содержащих ВМ, их обезвреживания и ликвидации, а также проверки новых физико-химических и других принципов построения функциональных схем данных средств;

- комплексная автоматизация процесса проведения экспериментальных исследований и испытаний средств, позволяющая повысить объективность результатов и безопасность персонала за счет исключения человеческого фактора из цепочки управления экспериментом;

- повышение количества измерительных каналов, точности и информативности измерений регистрируемых параметров и физических величин путем применения новых измерительных трактов и современных методик обработки результатов измерений;

- обеспечение возможности проведения экспериментальных исследований и испытаний многофункциональных средств, интегрирующих функции разведки и преодоления МВЗ, обнаружения ВОП, содержащих ВМ, их обезвреживания и ликвидации в одном базовом шасси.

На основе проведенного исследования разработаны методические основы технологии испытаний, даны технические предложения и конструкторские решения по оснащению пробеговой трассы для комплексных испытаний средств обнаружения и обезвреживания ВОП, содержащих ВМ, технологическим и измерительно-вычислительным оборудованием, а также технические требования и предложения по составу и характеристикам площадок, технологического оборудования и аппаратного оснащения.

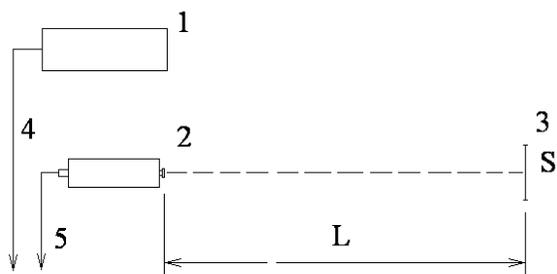
## ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРЫ ВЗРЫВНОГО ОБЛАКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

**О.В. ВОРОНЬКО, А.С. СМИРНОВ, С.В. СОРОКИН**

ОАО «ГосНИИмаш имени В.В.Бахирева»

606002, г.Дзержинск, Нижегородской обл., пр-т Свердлова 11а  
т. (8313) 367-000, факс (8313) 367-100, E-mail: [niimash@mts-nn.ru](mailto:niimash@mts-nn.ru)

В работе излагается методика, и приводятся результаты оценки температуры, мощности и энергии излучения облака сгорающего энергетического материала, полученного подрывом в воздухе макета цилиндрической формы, содержащего заряд ВВ и энергетический материал. Рассматривается характерный эксперимент с макетом массой 100 кг. Методика основана на способе определения яркостной температуры светящегося объекта с помощью быстродействующих фотоприемников с узкой спектральной полосой. При известных величинах площади светящейся поверхности  $S$  и расстояния от объекта до фотоприемника  $L$ , по величине сигнала с фотоприемника с помощью паспортной зависимости определяется яркостная температура объекта. В данной работе подобный способ и фотодатчики заимствованы у ВА РВСН им Петра Великого и МГТУ им. Н.Э.Баумана. Для учета изменения в процессе расширения облака его площади светящейся поверхности, известный способ дополнен скоростной видеосъемкой с помощью цифровой видеокамеры. Схема эксперимента показана на рисунке 1. В эксперименте использовалась камера «Phantom 672» в режиме: скорость съемки 10000 кадров/сек, экспозиция – 2.1 мкс.



- 1 – скоростная видеокамера; 2 – фотодатчик;  
3 – светящийся объект (облако); 4 – кабель связи и управления видеокамерой;  
5 – сигнальный кабель с фотодатчика

Рис. 1. Схема эксперимента

Изображения облака на кадрах видеосъемки с помощью разработанных программ обрабатывалось как вручную (сколом координат границ облака), так и автоматически. Определяли среднюю площадь светящейся поверхности облака, площади светящихся поверхностей при разных уровнях их яркости. Сигналы с фотоприемников (использовались два фотоприемника, один в ближнем ИК диапазоне,  $\lambda=730$  нм, другой - в видимой области спектра,  $\lambda=550$  нм) записывались цифровым осциллографом. Полученные сигналы затем с помощью специальной программы «очищались» от шумовой составляющей (сигнал интерполировался кусочно-полиномиальной зависимостью), убирался дрейф нуля. Ввиду большой длительности свечения облака, проводилась также компенсация спада сигнала с фотодатчиков. Параметры компенсации были определены из результатов моделирования фотодатчика дифференцирующей RC цепочкой и определения ее постоянной дифференцирования из эксперимента при подаче на фотодатчик импульса излучения прямоугольной формы. Это позволило увеличить время регистрации светового излучения имеющимися фотодатчиками в несколько раз, с  $\sim 15$  мс без компенсации, до  $\sim 30 \dots 70$  мс с компенсацией.

Полученные зависимости средней температуры и площади светящейся поверхности облака от времени показаны на рисунке 2, мощности и энергии излучения - на рисунке 3.

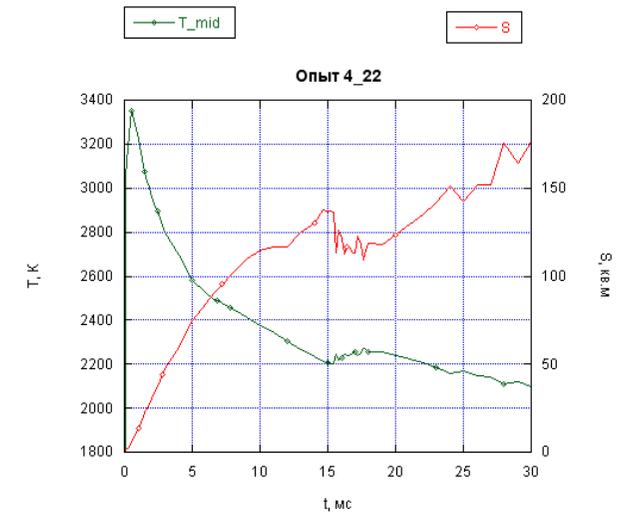


Рис. 2. Средняя температура и светящаяся площадь облака

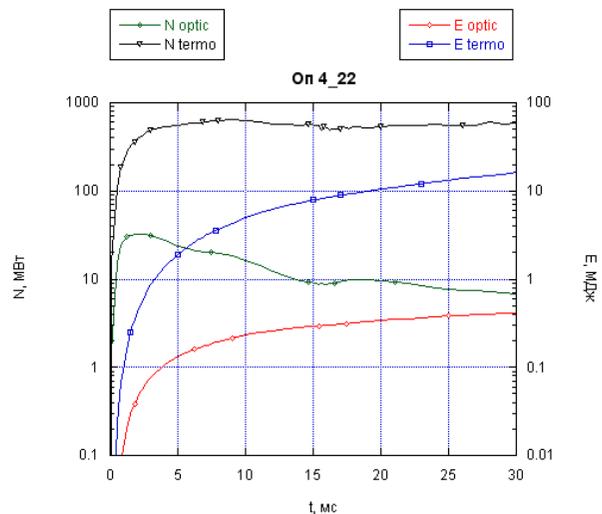


Рис. 3. Мощность и энергия излучения облака

Считаем, что в нашем случае объектами излучения служат частицы конденсированной среды, поэтому с учетом погрешностей датчиков, неточности и неопределенности других параметров, найденная яркостная температура близка к реальной температуре излучающей поверхности. Мощность и энергия излучения в выбранном спектральном диапазоне находилась расчетным путем. Из рисунка 3 видно, что мощность и энергия излучения в ИК диапазоне (*termo*) значительно превосходит мощность и энергию излучения в оптическом (*optic*) диапазоне.

После  $\sim 2$  мс на кадрах видеосъемки заметны неоднородности свечения облака. В работе определялись температуры неоднородно светящихся участков облака. Найденная ранее средняя температура соответствует среднему (0.5) уровню свечения облака в каждый момент. Участку же с уровнем  $Lev$  соответствует такая температура, при которой яркость излучающей поверхности в  $Lev/0.5$  раз выше. Ее находили по калибровочной зависимости, увеличив в  $Lev/0.5$  раз сигнал с фотодатчика в этот момент. Таким образом, для каждого кадра видеосъемки могут быть построены тарировочные зависимости температуры от яркости пиксела изображения облака, по которым могут определяться температуры интересующих участков. Примеры определения температурных полей для моментов 3 и 7 мс показаны на рисунке 4. Уровни максимальной температуры, закрашиваемые белым цветом, наблюдались только в центральной части облака (на рисунке 4 вверху). Для экономии краски при печати черный фон изображения облака на

рисунке 4 искусственно заменен белым, поэтому не следует путать этот фон с максимальной температурой.

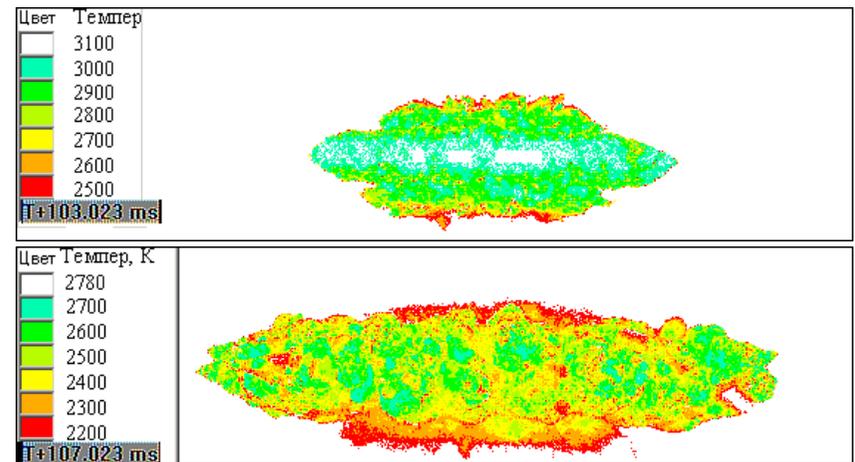


Рис. 3. Температурные поля облака в моменты 3 мс (вверху) и 7 мс

#### Выводы:

1 Создана методика регистрации температуры поверхности светящегося облака, позволившая получать новый качественный результат – возможность регистрации температуры по различным участкам поверхности облака.

2 Приведены для характерного эксперимента примеры температурных полей облака на моменты 3 мс и 7 мс.

3 Для характерного эксперимента получены оценки параметров оптического и теплового излучения.

4 Найдены параметры компенсации спада сигнала фотодатчиков, позволившие увеличить время регистрации светового излучения имеющимися фотодатчиками в несколько раз, с  $\sim 15 \text{ мс}$  без компенсации, до  $\sim 30 \dots 70 \text{ мс}$  с компенсацией

## СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПОЛИГОННЫХ ИСПЫТАНИЙ

**И.Е. ЖУКОВ, И.Б. СНЕГУР**

*К-043, г. Санкт-Петербург, в/часть 33491*

*Т.(812) 527-80-10 доб.716, факс (812) 527-93-31*

Для оценки показателей качества опытных образцов вооружения при проведении испытаний производится определение опытных значений ТТХ, что требует при современных объемах измерений и сложности аппаратуры рациональной организации измерительно-вычислительных комплексов.

Для проведения динамических измерений используется следующая измерительно-вычислительная техника: измерение температуры (ИВК для измерения температур на базе устройства высокоточного ввода NI 4351, автономная прикладная термопара ТЦМ, бесконтактный пирометр); измерение ускорений, вибраций, давлений, перемещений (виброизмерительная аппаратура ВИБ-6ТН, ИВК на базе промышленного компьютера CF-29); измерение деформаций, сил, давлений (тензостанции ЛХ-7000, ЛХ-7006, «Салют», «Тензор-2С»); регистрация результатов динамических измерений (ИВК для проведения транспортных испытаний на базе промышленного ноутбука CF – 29, АЦП E14-440, E20-10, USB 3000); получение, обработка, и предварительное усиление сигналов (усилители многофункциональные ПУНЖ-1-02, «Брюль и Кьер» 2651, усилители АВQ-03).

При выполнении баллистических и траекторных измерений (БТИ) осуществляется: определение текущих координат и координат разрыва снарядов (АРК 1Р239-1, «Ирис 66Е6», аппаратура службы единого времени 14Б766); определение начальной скорости и параметров кучности (хронометр «РУШ-МП», регистратор скорости РС-4М, измеритель скорости ИС-2К (на базе ФЭБ-7), АБС-1, АБС-1М, баллистическая станция «Луч – СМ», доплеровская радиолокационная станция «Луч-83М», доплеровская радиолокационная станция «Луч-88М», измеритель начальной скорости 1Б66 «Рампа», баллистическая артиллерийская мишень БАМ-М, АРМ «Испытатель», фотоэлектронная блокировка «ФЭБ-7М», фотоэлектронная блокировка «ФЭБ-5М»); определение давления в зарядной камере и канале ствола артиллерийских орудий, миномётов и стрелкового оружия (крешерные приборы, станция регистрации давления «Нейва-4К», аппаратура измерения давления «ЭРД-6000»); регистрация быстропротекающих процессов (рентгеновские аппараты: МИРА-2Д, МИРА-5Б/1, МИРА-8Б/1,РИНА-3Б/6, скоростная киносъемка СКС-1М).

Стремительное развитие современных технологий и средств автоматизации, вытесняют из практики морально и физически устаревшие средства измерений. Направления развития измерительно-вычислительной базы определяются повышением требований к качеству проведения измерений, под которым понимается совокупность свойств состояния измерений, обуславливающих получение результатов с требуемыми точностными характеристиками, в необходимом виде и в установленный срок. Для решения поставленных задач необходимо продолжать и расширять работы по автоматизации измерений, включающие в себя внедрение специализированных и универсальных ИВК, современной усилительно-преобразующей аппаратуры, измерительных преобразователей, каналов передачи данных.

## МЕТОД ОБОСНОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К СИСТЕМЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

**А.В. ЗАЙЦЕВ**

*Михайловская военная артиллерийская академия  
195009, г. Санкт-Петербург, ул. Комсомола, 22*

Корректное решение задачи многопараметрического прогнозирования технического состояния ракет Сухопутных войск при помощи метода главных компонент предполагает подтверждение значимости исходной матрицы парных корреляций (ковариаций) и достаточности числа обобщенных факторных признаков в анализе.

Значимость корреляционной матрицы подвергается проверке, если принять во внимание, что незначимые корреляционные (ковариационные) связи элементарных признаков не дают оснований вообще для поиска обобщенных признаков. В этом случае все вычислительные собственные числа  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$  будут близки единице, и обобщенные факторы по составу становятся очень похожими на элементарные признаки. Проведение факторного анализа теряет смысл.

Проверка значимости матрицы парных корреляций осуществляется при помощи критерия Уилкса —  $\chi^2$  [1], его наблюдаемое значение оценивается по формуле:

$$\chi_H^2 = - \left[ n - \frac{1}{6}(2m - 5) \right] \cdot \ln |R|, \quad (1)$$

где  $R$  — матрица парных корреляций;  $m, n$  — соответственно число

наблюдаемых объектов и число элементарных признаков в анализе.

Расчет  $\chi^2$ -критерия не представляет трудностей. Так как уже на начальной стадии исследования, после получения собственных чисел определитель  $|R|$  находится из выражения

$$|R| = \prod_{j=1}^m \lambda_j \quad (2)$$

Наблюдённое значение критерия Уилкса сравнивается с табличным для  $\chi^2$ -распределения при заданном уровне параметра  $\alpha$  и числе степеней свободы

$$v = 1/2m \cdot (m - 1)$$

Значимость корреляционной матрицы подтверждается при

$$\chi_H^2 > \chi_{\alpha, v}^2 \quad (3)$$

Для оценки достаточности числа выделенных общих признаков (факторов) используется критерий  $\chi^2$  несколько иной конструкции. В частности, для используемого в работе метода главных компонент расчет  $\chi^2$ -критерия осуществляется по формуле Бартлетта [2]

$$\chi_H^2 = - \left[ n - \frac{1}{6}(2m - 5) - \frac{2}{3}r \right] \cdot \ln R_{m-r}, \quad (4)$$

здесь  $r$  – число оставленных в анализе главных компонент;

$$R_{m-r} = \frac{|R|}{\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \dots \cdot \lambda_r \left[ \frac{m - \lambda_1 - \lambda_2 - \dots - \lambda_r}{m - r} \right]}. \quad (5)$$

В этом случае число степеней свободы для  $\chi^2$  будет

$$v = \frac{(m - r)(m - r - 1)}{2}. \quad (6)$$

Наблюдённое  $\chi_H^2$  значение сравнивается с табличным  $\chi_{\alpha, v}^2$

и если

$$\chi_H^2 < \chi_{\alpha, v}^2 \quad (7)$$

принимается предположение о том, что выделенные  $r$  главных компонент достаточно полно представляют дисперсию  $r$  элементарных признаков и остальные главные компоненты:  $F_{r+1}$ ,  $F_{r+2}$ , ...,  $F_m$  могут в анализе не рассматриваться из-за незначительного уровня их информативности. В противном случае в анализе для формирования выводов должны быть введены дополнительно другие главные компоненты.

На основании предложенных аналитических зависимостей и

граничных условий может быть реализован метод обоснования требований к системе исходных данных многопараметрического прогнозирования, позволяющий принимать обоснованные решения по:

- составу многомерно прогнозируемых контролируемых параметров в анализируемом объеме контроля;
- количеству измерений каждого параметра и отбраковке возможно аномальных;
- количеству главных компонент, минимально необходимых для реализации метода многопараметрического прогнозирования технического состояния ракет Сухопутных войск.

Для реализации приведенных формульных зависимостей в метод выражение (2) подставляется в (1) и последнее преобразуется к виду

$$|R|_{\text{доп}} > e^{-\frac{\chi_{\alpha, \nu}^2}{\left[ \frac{n-1}{6}(2m-5) \right]}}, \quad (8)$$

где  $R$  – матрица парных корреляций;  $m$ ,  $n$  – соответственно число наблюдаемых объектов и число элементарных признаков в анализе;  $\chi_{\alpha, \nu}^2$  – табличное значение критерия Пирсона;  $\alpha$  – заданный уровень значимости параметра;  $\nu$  – число степеней свободы.

Подстановка различных значений  $n$  и  $m$  позволяет получить на основе выражения (8) расчетные таблицы допустимых значений  $|R|_{\text{доп}}$  полученные в программе Microsoft Excel.

Для проверки работоспособности разработанного метода проведён вычислительный эксперимент. Результаты вычислительного эксперимента, по расчету  $|R|$  для различного количества контролируемых параметров при фиксированном количестве измерений ( $n=83$ ), показали, что функция  $|R| = f(m)$  является убывающей и показывает, что при любом уровне значимости как минимум при 15 контролируемых параметров из ранжированной совокупности обеспечивается значимость корреляционной матрицы.

В результате проведенного вычислительного эксперимента, реализованного на основе разработанного метода можно сделать вывод, что поставленные задачи осуществимы.

Общая схема обоснования требований к системе исходных данных многопараметрического прогнозирования представлена на рисунке 1.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Уилкс С. Математическая статистика. – М. Главная редакция физико-математической литературы, 1967. – 632 с.
2. Сошникова Л.А., Тамашевич В.Н., Уебе Г. и др. Многомерный статистический анализ в экономике. – М. М.: Юнити, 1999. – 598 с.

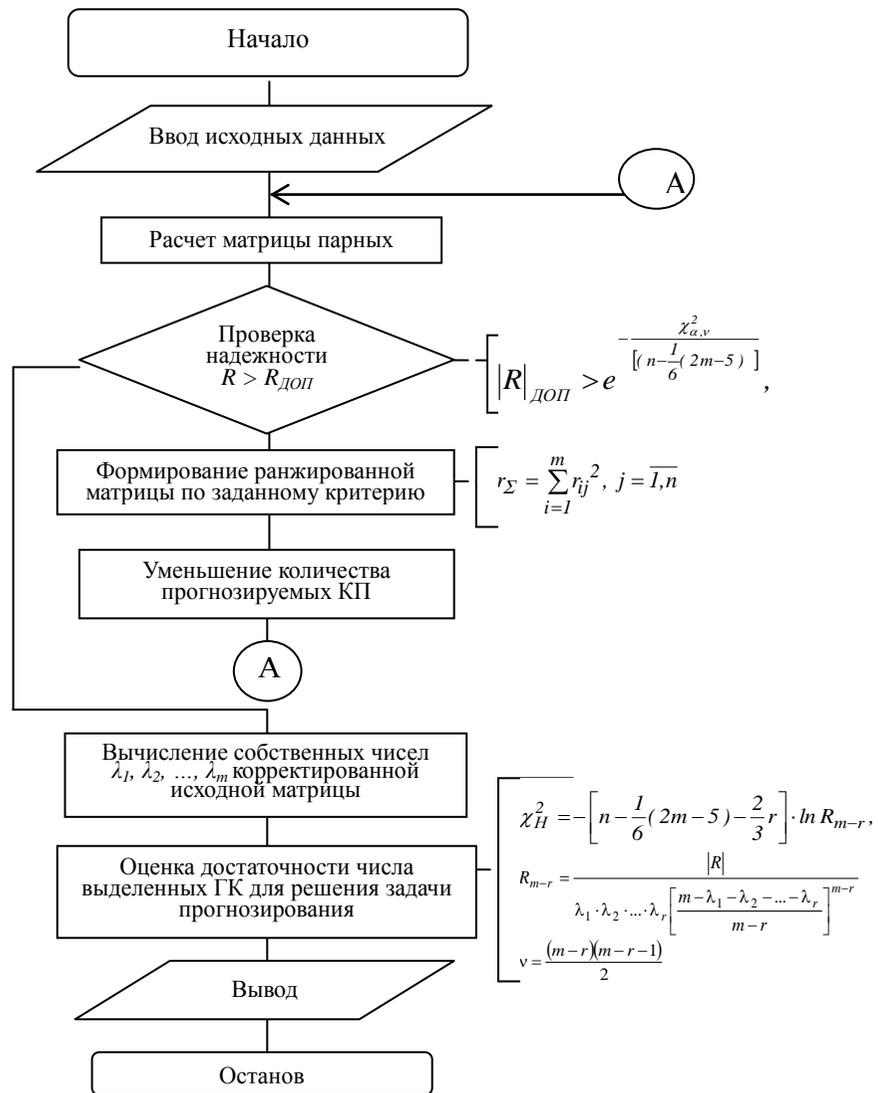


Рис. 1. Общая схема обоснования требований к системе исходных данных многопараметрического прогнозирования

## МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РАКЕТ СУХОПУТНЫХ ВОЙСК

**А.В. ЗАЙЦЕВ**

Михайловская военная артиллерийская академия  
195009, г. Санкт-Петербург, ул. Комсомола, 22

Анализ жизненного цикла ракет Сухопутных войск (СВ) показывает, что прогнозирование изменения уровня их технического состояния (ТС) должно осуществляться по совокупности значительного количества параметров, в большинстве случаев стохастически связанных между собой. Следовательно, актуален подход к прогнозированию технического состояния ракет СВ, позволяющий обобщить информацию об объекте контроля (ОК) и системе контроля технического состояния (СКТС) путем построения их многомерных прогнозных моделей, и только после этого предполагающий процедуру прогнозирования технического состояния ракет СВ.

Из анализа особенностей процесса автоматизированного контроля концептуальную модель функционирования системы многопараметрической системы контроля технического состояния можно представить как показано на рисунке 1.

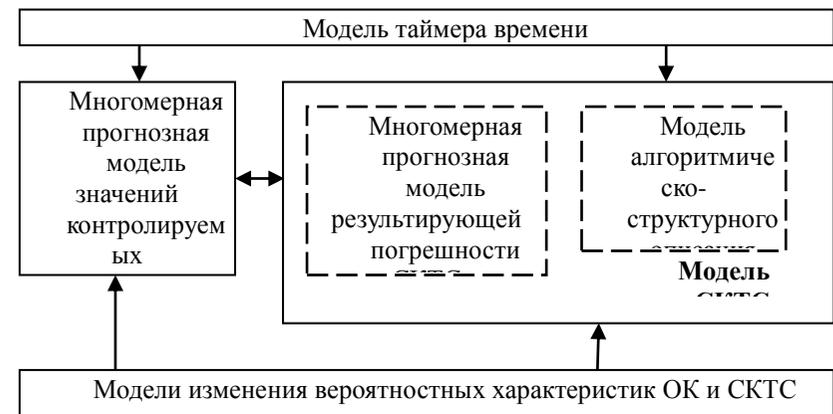


Рис. 1. Идеальная модель прогнозирования оценки технического состояния ракет СВ

Она содержит:  
имитационную модель ОК по совокупности контролируемых параметров (КП);

имитационную модель многопараметрической СКТС данной системы в виде многомерного статистического вектора погрешностей по каждому

измерительному тракту (ИТ) и модели алгоритмическо-структурного описания СКТС, в которой реализованы все способы повышения достоверности контроля;

в случае решения задач прогнозирования ТС ОК и СКТС в модель дополнительно включаются модель таймера времени, позволяющего сжимать (растягивать) процессы во времени, и модель изменения вероятностных характеристик ОК и СКТС, обусловленных процессом эксплуатации.

Следовательно, для построения рассматриваемой модели необходимо предварительно решить гамму задач [1]:

описать ОК через характеристики вероятностных распределений КП

$$X(t) = \{x_i(t)\}, \quad i = \overline{1, N}; \quad F_X = F(x_i(t) < X_i),$$

где  $\{x_i\}$ ,  $N$  – совокупность и число КП соответственно;

задать многопараметрическую область работоспособности ОК  $\Omega_{OK}$  на множестве КП

$$\Omega_{OK} = \{\Omega(x_i)\}, \quad i = \overline{1, N},$$

где  $\Omega(x_i) = [x_{Hi}; x_{Bi}]$ ,  $i = \overline{1, N}$  – область работоспособности  $i$ -го параметра;

описать СКТС через характеристики вероятностных распределений случайной величины (СлВ) погрешностей  $Y = \{Y_j(t)\}$  канала контроля

$$Y = \{y_i(t)\}, \quad i = \overline{1, N}; \quad F_Y = F(y < Y),$$

где  $\{y_i\}$  – совокупность погрешностей СКТС по каждому КП;  $N$  – число КП;

описать результаты  $Z = \{z_i(t)\}$ ,  $i = \overline{1, N}$  наблюдений (измерений) КП через вероятностные характеристики распределений сумм СлВ

$$(X + Y) = Z; \quad F_Z = F(z < Z),$$

а также задать область  $W$  принятия решений "годен"

$$W = \{\omega(z)\}, \quad i = \overline{1, N},$$

где  $\omega(z_i) = [z_{Hi}; z_{Bi}]$ ,  $i = \overline{1, N}$  – область принятия решений СКТС по  $i$ -му параметру.

Особенности современных реалий многолетних, но сокращенных по объему Государственных испытаний, позволяют предположить, что разработчик ОК и СКТС не будет располагать достаточной информацией для построения моделей изменения вероятностных характеристик ОК и СКТС, вследствие этого для реализации прогнозной модели необходимо задаться допущениями относительно динамики изменения вероятностных характеристик моделей ОК и СКТС во времени.

Способом учета изменения ТС, вызванного процессом

постепенного старения и (или) процессом скачкообразной деградации элементов и блоков ИТ, является аппарат диффузионных распределений [2].

Эти распределения с достаточной для практики точностью отражают деградационные процессы, изменяющие выходные параметры проектируемых изделий. Деградационные процессы – это вполне определенные физические (механические, механико-физические, химические, физико-химические и т.д.) процессы, которые, как и момент появления отказа, имеют случайный характер. Методология установления количественных характеристик деградации заключается в исследовании и выявлении кинетических закономерностей возникновения отказов (сбоев).

Существует несколько схем формализации вероятностно-физических моделей отказов (изменения погрешностей ИТ), среди которых математические модели процессов деградации в виде непрерывных марковских процессов представляются более адекватными. Им соответствуют диффузионное монотонное (DM-распределение) вида

$$F(t) = \Phi\left(\frac{t - \frac{1}{a}}{\frac{v}{\sqrt{a}}\sqrt{t}}\right), \quad t \in [0, \infty] \quad (1)$$

где  $a, v$  – параметры масштаба и формы закона распределения изменения степени работоспособности ОК ( $a > 0, v > 0$ );

$$\Phi(\eta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\eta} e^{-\frac{y^2}{2}} dy \quad \text{нормированная функция Лапласа, и}$$

немонотонное (DN-распределение) вида

$$F(t) = \Phi\left(\frac{ta - 1}{v\sqrt{ta}}\right) + e^{\frac{2}{v^2}} \Phi\left(-\frac{ta + 1}{v\sqrt{ta}}\right), \quad t \in [0, \infty]$$

распределения наработки до выхода КП за границы области работоспособности в зависимости от характера реализаций рассматриваемого физического процесса. Преимуществами диффузионных распределений является их гибкость, позволяющая выравнять опытные данные с большей точностью, а также сравнительная простота их моделирования.

Продемонстрируем это на примере DM-распределения.

Для этого выражение (1) преобразуется

$$t - \frac{1}{a} = \frac{v}{\sqrt{a}}\sqrt{t}\eta \quad (2)$$

При введении переменной  $x = \sqrt{t}$ ,  $x \geq 0$  и подстановке ее в выражение (2), получается квадратное уравнение

$$x^2 - \frac{v\eta}{\sqrt{a}}x - \frac{1}{a} = 0,$$

решение которого представляет собой искомую величину

$$t = \left[ \frac{v\eta}{2\sqrt{a}} + \sqrt{\left( \frac{v\eta}{2\sqrt{a}} \right)^2 + \frac{1}{a}} \right]^2,$$

где  $\eta$  – случайная величина из генеральной нормальной совокупности с параметрами  $m = 0$ ,  $\sigma = 1$ , получаемая при помощи известных процедур.

Аналогично получается МА для квантили DN-распределения. Окончательное выражение в этом случае записывается

$$t = \frac{(\eta_1 - \eta_2)^2 v^2}{4a},$$

где  $\eta_1, \eta_2$  - пара случайных величин из стандартной генеральной нормальной совокупности ( $v > 4$ ).

Рассмотренная модель может быть классифицирована как физическая модель, полученная на основе изучения физических закономерностей, параметры которой имеют физическое толкование, вследствие того, что вероятностные характеристики деградационных скачков не определены

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Тукеев Д.Л.* Система задач многопараметрического синтеза аппаратуры контроля и управления систем высокоточного оружия. М.: В/ч 11520, сборник депонированных рукописей, выпуск 59, инв. В4946, 2002 г.
2. *Погребинский С.Б., Стрельников В.П.* Проектирование и надежность многопроцессорных ЭВМ. – М.: Радио и связь, 1988. – 168с.

## **МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПРОТИВОУДАРНОЙ СТОЙКОСТИ БРОНЕШЛЕМОВ ПРИ НЕПРОБИТИИ ПОРАЖАЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ**

**С.М. ЛОГАТКИН, А.С. АНДРЕЕВ**

*К-043, г. Санкт-Петербург, в/часть 33491  
Т.(812) 527-80-10 доб.716, факс (812) 527-93-31*

В нашей стране на сегодняшний день остро встала проблема оценки качества бронешлемов по параметру заброневого (запреградного) воздействия при непробитии корпуса изделия поражающими элементами. Несмотря на то, что композитные бронешлемы находятся на снабжении ВС РФ с 2000 года, до настоящего времени не существует единой методики их оценки по данному параметру.

Нами рассмотрены существующие отечественные и зарубежные методы оценки бронешлемов, которые условно могут быть подразделены на следующие две группы:

- основанные на определении ускорения в модели головы;
- предусматривающие оценку контактного нагружения модели головы.

Предварительное рассмотрение наиболее распространенных методов контроля выявило необходимость проведения собственных исследований (для объективной оценки предлагаемых моделей и методов) с применением импульсной рентгенографии. Исследования показали, что при попадании 9-мм пули из пистолета ПМ в бронешлем средняя скорость деформации его корпуса (от момента попадания пули до её полной остановки) составляет около 30 м/с. За то же время скорость перемещения корпуса бронешлема не превышает 1 м/с. Приведенные данные показывают, что именно локальная деформация корпуса бронешлема преимущественно определяет эффект заброневого воздействия.

В результате анализа, проведенного с учётом результатов собственных исследований и наблюдений, можно сделать вывод, что идеального метода оценки допустимости заброневого воздействия при непробитии корпуса бронешлема не существует.

Преимуществом одних является простота процедуры испытаний и отсутствие необходимости в сложном дорогостоящем оборудовании. Современные и точные измерения, соответственно, требуют сложного технического оснащения и квалифицированного персонала.

Определены перспективные направления работ по разработке единого метода контроля качества бронешлема.

## МЕТОДИКА СИНТЕЗА СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

**М.А МАКСИМЕНКО**

*Михайловская военная артиллерийская академия  
195009, г.Санкт-Петербург, ул.Комсомола, 22*

В настоящей статье проведен анализ существующих методик синтеза СКТС. Проведенный анализ позволил авторам предложить ряд методов с помощью которых возможно добиться усовершенствования НМА синтеза СКТС сложных систем. Предложенная методика позволяет проводить работы по созданию НМА позволяющего проводить оценку СУ современных РК СВ.

Существенно повышающийся уровень сложности перспективной ракеты СВ, выход из строя которой на любой стадии жизненного цикла может привести к значительным потерям (экономическим, финансовым, человеческим и др.), требует адекватного высокоэффективного оценивания и прогнозирования ее технического состояния и, при необходимости, выявления времени, причины и места отказа.

В рассматриваемом контексте СКТС в целом можно рассматривать как замкнутую динамическую систему управления качеством (эффективностью) функционирования уникального объекта однократного применения, в которой контроль обеспечивает восприятие информации о текущем состоянии объекта и принятие решения, определяющего управляющие воздействия на него. Таким образом, данные текущего контроля являются той единственной информационной основой, на базе которой строится стратегия ее дальнейшей эксплуатации, а также в перспективе будет осуществляться адаптивное управление в полете путем поддержания максимально возможного уровня достоверности получаемой информации о текущем местоположении ракеты, что и определяет высокие требования к качеству этих операций и то внимание, которое уделяется проблемам автоматизированного контроля в последние годы.

Анализ литературы по данной проблеме показывает, что на эффективность процесса контроля оказывают влияние:

полнота и достоверность контроля параметров блоков и подсистем РК, надежность которых меняется в ходе эксплуатации. Для обеспечения этого направления применяются средства автоматизированного и тестового контроля, включающие в себя также и алгоритмы поиска неисправных элементов. Ведется работа в направлении формирования гибких алгоритмов;

периодичность контрольных проверок и регламентов, которая

зависит от качества принятия решения по множеству факторов, в том числе от текущего уровня надежности контролируемых систем;

Анализ источников показал, что контроль технического состояния всех без исключения тактических ракет и управляемых реактивных снарядов искусственно и необоснованно сужен до проведения соответствующих проверок на технической и стартовой позициях. В настоящее время процесс полетного контроля отсутствует как таковой и сводится к ликвидации изделия при аварийных режимах работы.

Все существующие методы контроля технического состояния принято разделять по следующим классификационным признакам /35...37/:

А) по способу оценивания результата контроля - на допусковые и измерительные, каждый из которых обладает как достоинствами, так и недостатками.

Б) по количеству контролируемых параметров – на многопараметрические, однопараметрические и тестовые. В работе в понятие «многопараметрический» вкладывается несколько иной, чем общепринятый смысл контроля. Подразумевается, что оценивается не только несколько параметров, но и корреляционные связи между ними, что ранее (из-за отсутствия научно-методического аппарата) не рассматривалось.

В) по используемой элементной базе в аппаратуре контроля – на аналоговые и цифровые;

Г) по стратегии контроля – на полный и выборочный. Высокая стоимость современных и перспективных образцов вооружения накладывает жесткие ограничения на стратегию испытаний, цель которых применительно к ракетным комплексам сужается до подтверждения соответствия летных и точностных характеристик ракет-носителей допустимым, не оставляя средств и ресурсов на проведение дополнительных исследований по обоснованию (уточнению) областей работоспособности контролируемых параметров исходя из их информативности и значимости. Это приводит к дальнейшим значительным затратам в течение всего немалого срока эксплуатации на проверку неинформативных параметров, т.е. параметров, выход которых за пределы области работоспособности маловероятен.

Существующие СКТС обладают следующими недостатками:

1. Применяемые методы контроля не всегда обеспечивают гибкое реагирование на конкретную боевую ситуацию, поскольку не приспособлены к анализу возможностей выполнения боевой задачи ракетой, уровень технического состояния которой ниже допустимого, а запрограммированы на «жесткий» проверку наличия предельно возможного уровня работоспособности, при отсутствии которого ракета

бракуется.

2. Проверки технического состояния существующих и перспективных ракет направлены на последовательный контроль множества косвенных параметров, решение полноценной тестовой задачи отсутствует. Как следствие, невозможно дать ответ на вопрос: способна ли перспективная ракета выполнить если не все, то некоторые боевые задачи.

3. При проверке технического состояния рассматривается однопараметрическая область работоспособности объекта контроля и не учитывается фактор взаимовлияния контролируемых параметров, не в полном объеме решена задача выбора контролируемых параметров;

4. Применение жесткого последовательного контроля ракет приводит к увеличению времени контроля и снижает боевую эффективность ракетного комплекса в целом.

5. Отсутствует градация ширины области работоспособности, позволяющая сопоставить совокупность решаемых задач с текущим техническим состоянием перспективной ракеты.

6. В задачи СКТС не входит прогнозирование технического состояния ракеты, а также места вероятного отказа.

Анализ реализаций СКТС РК показывает, что существующие СКТС созданы по последовательно-параллельной однопараметрической схеме. Ее сущность заключается в том, решение о годности ракеты принимается в случае нахождения в заданном допуске работоспособности каждого из заранее заданного количества КП, предполагаемых независимыми, проверенных в фиксированной последовательности, «зашитой» в блок памяти НЦВМ, что не соответствует современным возможностям алгоритмизации контроля и обработки полученной информации, требующих многомерного подхода с учетом корреляционных связей между параметрами.

Таким образом, приведенный анализ показывает, что весьма актуальным вопросом совершенствования ракетных комплексов является разработка научно-методического аппарата синтеза систем контроля технического состояния перспективной ракеты СВ, который позволял бы:

Исходя из функционального предназначения блоков и подсистем СУ перспективной ракеты построить их модели функционирования в виде многомерных датчиков случайных чисел совокупности наиболее информативных параметров, на основе которых сформировать их области работоспособности.

1. Разработать алгоритмы и процедуры построения многопараметрической модели системы контроля в виде многомерного вектора результирующих погрешностей, вносимых СКТС в результат измерения.

2. На основе результатов решения первых двух задач построить многомерную модель функционирования СКТС, позволяющую оценить ее эффективность, а также предложить разработчикам СКТС рекомендации по оптимизации распределения точности между отдельными каналами, в каналах – между отдельными устройствами, а также по назначению оптимальных границ области работоспособности КП.

3. Учесть взаимовлияние параметров блоков и подсистем в виде функционально-логических схем функционирования.

4. Разработать алгоритм полного тестового контроля СУ, учитывающего возможную градацию уровня работоспособности блоков и подсистем, ее составляющих.

5. В качестве показателя технического состояния иметь такой (или несколько), который позволял бы сделать необходимый для формирования дальнейшей стратегии эксплуатации вывод – «годен», «не годен» или «ограниченно годен», на основе анализа результатов измерения множества косвенных показателей, структура измерения которых и их номенклатура могут изменяться.

Применять в качестве области работоспособности не жестко заданные границы (допуска) значений, а иметь область работоспособности, границы которой гибко реагируют на изменение условий эксплуатации и применения.

## **МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА УЛЬТРА- И НАНОДИСПЕРСНЫХ КОМПОНЕНТОВ ЭНЕРГОЁМККИХ КОМПОЗИТОВ**

***Г.Я. ПАВЛОВЕЦ, И.П. РОМАНОВА, И.В. КРОПАЧЕВА***

*Военная академия РВСН имени Петра Великого  
109074, Москва, Китайгородский проезд, д.9, тел.(985) 928-45-14,  
E-mail pavlovets@yandex.ru*

Повышение эффективности средств поражения и боеприпасов различного функционального назначения может быть обеспечено не только за счёт использования в энергоёмких композитах (ЭК) вновь синтезируемых соединений с высокой энергетической плотностью, но и путём модификации свойств известных компонентов, например, переводом компонентов ЭК в ультра- и наноразмерное состояние. Известно, что наночастицы и наноматериалы обладают комплексом физических, химических свойств и биологическим действием, которые

часто радикально отличаются от свойств этих же веществ в виде массивных образцов. Наиболее значимыми при этом являются такие характеристики ультра- и наноразмерных компонентов (УНК), как среднемассовый размер частиц, распределение по дисперсности, содержание основного вещества, которые определяют эффективность их применения в ЭК. С другой стороны, металлические УНК обладают пирофорностью (способностью к самовозгоранию на воздухе), могут образовывать пожаро- и взрывоопасные аэрозоли, склонны к окислению и агрегации. Окислители и взрывчатые вещества (ВВ) склонны к агрегации, характеризуются высокой гигроскопичностью.

В целом это затрудняет или делает невозможным диагностику УНК традиционными методами. В связи с этим возникает необходимость в разработке комплекса средств диагностики УНК для использования в качестве компонентов ЭК, исключающем изменение характеристик порошков в процессе анализа их характеристик. Для его создания требуется, прежде всего, обосновать выбор методик аттестации наноконструктивных и оценить возможности использования средств диагностики наноструктурных материалов применительно к нанопорошкам для энергоёмких композиций. Наряду с этим требуется разработка и аттестация методик определения характеристик УНК с учетом их номенклатуры, свойств и функционального предназначения в объеме технических условий на компоненты и расширенную оценку их специальных свойств.

Анализ современных методов диагностики показывает, что в мировой и отечественной практике для исследования формы, размера, кристаллической структуры, фазового и химического состава наночастиц используют химические, электрохимические, спектроскопические, термические, масс-спектрометрические, микроскопические, хроматографические и другие классические методы. Однако в большинстве своем рассмотренные методы диагностики не приемлемы для оценки качества УНК ЭК либо из-за низкой точности метода, либо высокой стоимости оборудования, либо разрушения анализируемого образца воздействием высокой энергии электронного пучка. При этом основными факторами, исключающими их применение для диагностики УНК ЭК, являются пирофорность металлических порошков, низкая термическая стойкость и гигроскопичность большинства окислителей и ВВ и отсутствие в целом способов пробоподготовки УНК для анализа. Ряд из рассмотренных методов с соответствующим аппаратным оформлением может быть рекомендован для проведения фундаментальных исследований свойств нанопорошков различной природы.

Учитывая особые свойства УНК ЭК, обоснован перечень

показателей качества, необходимых для контроля на этапах производства нанокomпонентов, их входного контроля и оценки качества порошков с истекшими гарантийными сроками хранения. К числу таких показателей качества, требующих разработки соответствующих методик, отнесены:

- массовая доля основного вещества;
- массовая доля воды (растворителя);
- гранулометрический состав и среднemasсовый размер частиц;
- удельная поверхность.

Кроме того, с уменьшением размера частиц ряда УНК изменяются показатели их пожаровзрывоопасности (нижние и верхние концентрационные пределы воспламенения и детонации), что требует оценки указанных характеристик.

В целом используемые в объеме ГОСТ (ТУ) на компоненты ЭК методики не обеспечивают диагностику УНК по обоснованным показателям качества. При этом следует учитывать, что к настоящему времени отсутствуют ГОСТ (ТУ) на нанодисперсные компоненты ЭК и требования к их качеству.

Обоснован технический облик измерительных установок и определен перечень средств диагностики, обеспечивающих аттестацию нанодисперсных компонентов в объеме рекомендуемых для оценки следующих показателей качества:

- среднего размера частиц и фракционного состава наноразмерных компонентов;
- влажности УНК;
- удельной поверхности УНК;
- удельной теплоты сгорания (энтальпии образования) УНК;
- показателей пожаро- и взрывоопасности аэрозолей УНК.

В состав измерительных устройств для диагностики УНК по указанным показателям качества ЭК входят:

- диффузионный аэрозольный спектрометр ДАС-2702 с автоматической системой диспергирования АСДНП-3705;
- анализатор влажности МХ-50;
- быстродействующий анализатор сорбции газов Quantachrome NOVA;
- калориметр сжигания для энергоемких соединений типа КЛТ-2;
- модернизированная установка «Универсал» для определения показателей пожаро- и взрывоопасности аэрозолей высокодисперсных порошков.

Перечень стандартного оборудования в составе измерительных устройств может быть пополнен и уточнен по мере разработки методик анализа УНК и их экспериментальной отработки.

Определение среднего размера частиц и фракционного состава

высокодисперсных пирофорных порошков при помощи спектрометра ДАС-2702 с автоматической системой диспергирования АСДНП-3705 заключается в пропускании анализируемого потока воздуха или другого газа, содержащего аэрозольные частицы, через диффузионные батареи, на которых осаждаются высокодисперсные частицы, содержащиеся в потоке. Скорость осаждения зависит от коэффициента диффузии частиц в газе, а диффузия однозначно связана с размером частиц. Измеряется проскок частиц (долю частиц, которые прошли через батареи без осаждения) через диффузионные батареи и сравнивается с расчетным размером, определяемым полуэмпирическим методом).

Определение влажности высокодисперсных пирофорных порошков на анализаторе влажности MX-50 заключается в измерении массы образца при нагреве с использованием системы нагрева на базе 400 Вт галогеновой лампы направленного действия с применением фильтра SRA и технологии взвешивания SHS.

Определение удельной поверхности высокодисперсных пирофорных порошков на быстродействующем анализаторе сорбции газов *Quantachrome* NOVA осуществляется за счет быстрого и точного определения сорбции азота (или другого некорродирующего газа) на поверхности твердых частиц.

Определение показателей пожаро- и взрывоопасности аэрозолей высокодисперсных порошков на установке «Универсал» проводится в реакционном сосуде посредством распыления порошков и последующего зажигания смеси с регистрацией температурных и временных параметров.

Определение удельной теплоты сгорания высокодисперсных пирофорных порошков на калориметре КЛТ-2 осуществляется путем измерения тепловыделения при сжигании навески вещества в специальной калориметрической бомбе.

Таким образом, получение достоверных данных об основных характеристиках и свойствах нанопорошков в качестве компонентов ЭК может быть обеспечено при наличии аттестованных методов диагностики, учитывающих специфические свойства наночастиц, включая высокую реакционную активность, гигроскопичность и склонность к агломерации. Наряду с этим требуется разработка и аттестование методик определения характеристик нанодисперсных компонентов с учетом их номенклатуры, свойств и функционального предназначения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Векилова Г.В., Иванов А.Н., Ягодкин Ю.Д. Дифракционные и микроскопические методы и приборы для анализа наночастиц и наноматериалов. Учебное пособие. –М.: МИСиС, 2009. -145с.

2. Нанотехнология: физика, процессы, диагностика, приборы /Под ред. Лучинина В.В., Таирова Ю.М. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. -552 с.
3. Александров В.С., Собенин А.П. Работы ВНИИМ им. Д.И. Менделеева по метрологическому обеспечению нанотехнологий, Мир стандартов, №5(16), 2007, с. 6–10
4. Постек М.Т. Метрология в нанометровом диапазоне, Вестник технического регулирования, №7(44), 2007. С. 8 – 17.
5. An V.V., de Izarra Ch., Korshunov A.V. et al. Methods for the Testing of Nanopowders//Proceedings of the Conference “European Nano Systems 2005” Paris, France, pp.177-182, 14-16 December 2005.

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА СТВОЛА АРТИЛЛЕРИЙСКОГО ОРУДИЯ ПРИ РЕЖИМНОЙ СТРЕЛЬБЕ**

*С.Д. СМЕТАНИН, А.Е.ХИЖНЯК*

*К-043, г. Санкт-Петербург, в/часть 33491*

*Т.(812) 527-80-10 доб.716, факс (812) 527-93-31*

Наиболее опасные для артиллерийского выстрела условия возникают при проведении режимных стрельб в аварийных случаях, когда разрядить ствол выстрелом не представляется возможным. При этом время безопасного нахождения патрона (снаряда) в канале ствола зависит от температуры канала ствола, конструкции снаряда и ствола, а также от режима стрельбы.

В исследовании проведен анализ аварийных ситуаций, связанных с нештатным срабатыванием элементов выстрелов в канале ствола практически всех видов артиллерийских орудий, анализ теплового состояния стволов артиллерийских орудий при режимных стрельбах и экспериментальных методов контроля температуры стволов в различных сечениях в процессе длительных стрельб.

Для решения задач исследования построена опытно-теоретическая модель прогнозирования температуры нагрева ствола при режимной стрельбе и разработана модель устройства для определения температуры внутренней поверхности канала ствола без нарушения его прочности.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОЩНОСТИ ДЫМООБРАЗОВАНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ ШЛЕЙФА РДТТ НА ВИДИМОСТЬ ОБЪЕКТОВ В ТЕПЛОВИЗОР

**А.Г. ШИПУНОВ, Е.Н. СЕМАШКИН, А.В. БОЛОТНИКОВ**

*Открытое акционерное общество*

*«Конструкторское бюро приборостроения»*

*300001, г. Тула, ул. Щегловская засека, 59*

*тел.: (4872) 41-00-68, факс: (4872) 42-61-39; 46-98-61,*

*E-mail: [kbkedr@tula.net](mailto:kbkedr@tula.net)*

Целью данной статьи является оценка влияния концентрации частиц и температуры дымового шлейфа на запасы по сигналу линии «тепловизор – объект наблюдения» при визировании объекта через теплый шлейф РДТТ.

Наведение управляемых ракет на цель с помощью тепловизионных оптических линий связи (ОЛС) может быть затруднено наличием на линии визирования горячего шлейфа ракеты. Возможны случаи, когда яркость шлейфа для тепловизора окажется выше яркости наблюдаемого объекта. В этом случае наблюдение за объектом будет затруднено до тех пор, пока температура не упадет до некоторого критического уровня.

Задача эта очень сложна и зависит не только от температуры шлейфа, но и от его оптической плотности, так как она определяет степень черноты шлейфа как излучателя.

Запасы по сигналу в ОЛС «тепловизор – объект наблюдения» составляют

$$Z = \frac{S_{об} |B_o - B_\phi| \cdot \theta_A \cdot \zeta}{\pi \cdot L^2 \cdot E_{пор} \cdot n(c/u)},$$

где  $S_{об}$  – площадь излучательной поверхности объекта в картинной плоскости;

$B_o, B_\phi$  – удельные энергетические яркости объекта и фона соответственно;

$L$  – дальность наблюдения;

$\theta_A$  – прозрачность атмосферы в спектральном диапазоне работы тепловизора;

$E_{пор}$  – пороговая облученность тепловизора, эквивалентная шуму (для тепловизоров  $3 \div 5$  мкм  $E_{пор} = 2,2 \cdot 10^{-10} \text{ Вт/м}^2$ ; для тепловизоров

$$8 \div 12 \text{ мкм } E_{\text{пор}} = 6,2 \cdot 10^{-10} \text{ Вт/м}^2);$$

$n(c/u) = 5$  – соотношение сигнал/шум, необходимое для решения задачи обнаружения;

$\xi$  – коэффициент использования излучения, учитывающий фильтрацию излучения оптикой и приемником тепловизора.

Условием работы линии будет неравенство

$$Z > 1.$$

Удельную энергетическую яркость фона составляют излучение атмосферы и дыма, составляющего шлейф ракеты.

$$B_{\phi} = B_{\text{атм}} + B_{\delta}.$$

$$B_{\text{атм}} = \left(1 - \exp(-\overline{\alpha_{\text{атм}}})\right) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r(\lambda, T_{\text{атм}}) d\lambda,$$

$$B_{\delta} = \left(1 - \exp(-\overline{\alpha_{\delta}})\right) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r(\lambda, T_{\delta}) d\lambda,$$

где  $\overline{\alpha_{\text{атм}}}, \overline{\alpha_{\delta}}$  – спектральные показатели ослабления тепловизионных сигналов атмосферой и дымовым шлейфом соответственно;

$T_{\text{атм}}, T_{\delta}$  – температуры атмосферы и дымового шлейфа соответственно;

$r(\lambda, T)$  – функция Планка для излучения абсолютно черного тела при температуре T;

$\lambda_1, \lambda_2$  – диапазон работы тепловизора.

Функция  $\left(1 - \exp(-\overline{\alpha_{\delta}})\right)$  есть не что иное, как степень черноты излучателя.

Показатель ослабления атмосферой состоит из аэрозольной и газовой составляющих

$$\alpha_{\text{атм}} = \alpha_{\text{аэп}} + \alpha_{\text{H}_2\text{O}} + \alpha_{\text{CO}_2}.$$

Показатель ослабления дымом составляет

$$\alpha_{\delta} = (\alpha_{\delta_0} - \alpha_{\text{атм}}) \cdot \Phi + \alpha_{\text{атм}}$$

где  $\alpha_{\delta_0}$  – показатель ослабления дымом на срезе сопла.

Закон распределения температур в струе можно определить как:

$$T = (T_0 - T_1) \cdot \Phi + T_1,$$

где  $T_1$  – температура окружающей среды;

$T_0$  – температура на срезе сопла;

$\Phi$  – решение уравнения типа теплопроводности, с помощью которого описывается распределение концентраций, скоростей и температур в струе РДТТ.

При решении задачи были взяты следующие параметры наблюдаемого объекта: площадь излучательной поверхности объекта в картинной плоскости  $S_{об} = 6 \cdot м^2$ , температура  $T_{об} = 30^\circ C$ , температура воздуха  $25^\circ C$ .

Варьируя температуру дымового шлейфа в диапазоне от температуры атмосферы до температуры струи на срезе сопла, можно определить критическую температуру, при которой не будет выполняться условие работы ОЛС. Были определены запасы по сигналу для тепловизоров, работающих в диапазоне  $3 \div 5 \mu м$  и  $8 \div 12 \mu м$ . Ниже приведены графики зависимостей запасов от температуры облака. Мощности дымообразования  $N(t)$  были взяты равными 2, 4 и 6  $м^2/с$ . Принимая, что частицы имеют сферическую форму со средним радиусом равным 0,5  $\mu м$ , получаем, что за одну секунду работы двигателя ракеты выбрасывает примерно  $2,54 \cdot 10^{12}$  частиц сажи.

При решении модельной задачи дальность до объекта наблюдения бралась 5 км, дальность метеовидимости 10 км и относительная влажность воздуха 40%. Ослабление сигналов атмосферой сознательно выбраны малыми с целью изучения влияния собственно дыма.

По графикам видно, что запасы по сигналу и максимальная температура облака, при которой возможно визирование цели, значительно выше для тепловизоров, работающих в диапазоне  $8 \div 12 \mu м$ .

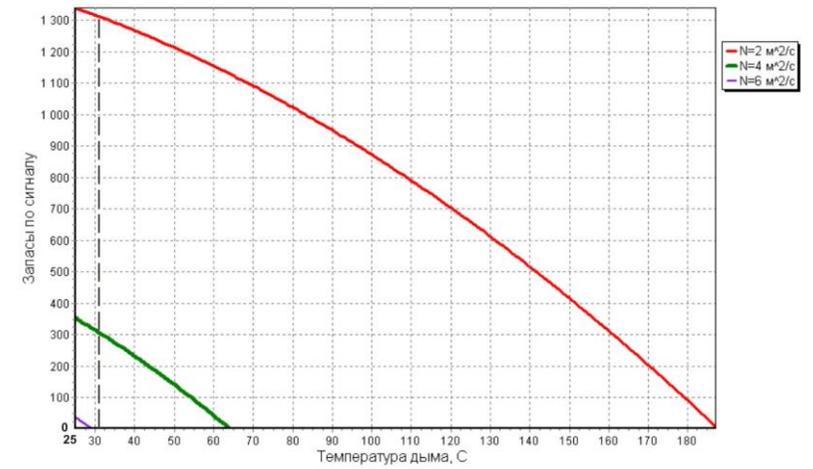


Рис. 1. Зависимость запасов по сигналу от температуры шлейфа для тепловизора 8 ÷ 12мкм. Пунктирной линией указана средняя температура шлейфа по центральной оси струи

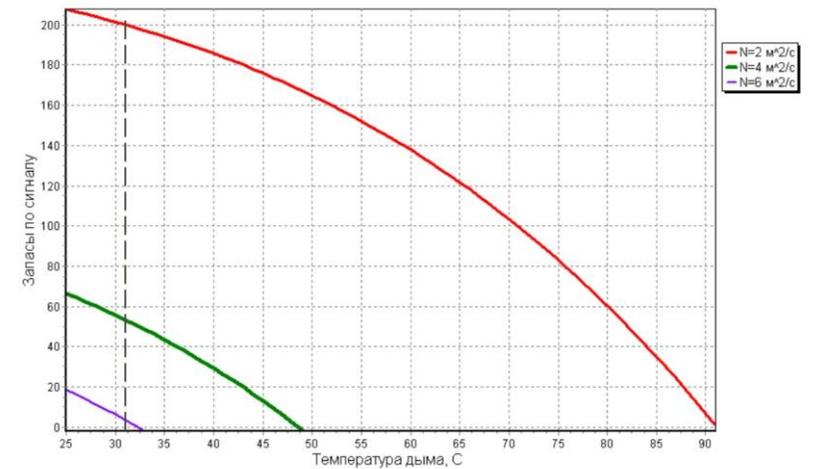


Рис. 2. Зависимость запасов по сигналу от температуры шлейфа для тепловизора 3 ÷ 5мкм. Пунктирной линией указана средняя температура шлейфа по центральной оси струи

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ДЫМООБРАЗОВАНИЯ РДТТ ПОСРЕДСТВОМ ЗОНДИРОВАНИЯ ЗАТОПЛЕННОЙ СТРУИ

**А.Г. ШИПУНОВ , Е.Н. СЕМАШКИН , Т.В. ГАРБУЗОВА ,  
Е.В. ГОЛОВАНОВА**

*Открытое акционерное общество  
«Конструкторское бюро приборостроения»  
300001, г. Тула, ул. Щегловская засека, 59,  
тел.: (4872) 41-00-68, факс: (4872) 42-61-39; 46-98-61,  
E-mail: [kbkedr@tula.net](mailto:kbkedr@tula.net)*

Мощность дымообразования двигателя (ослабляющая площадь аэрозоль) в единицу времени является характеристикой, определяющей прозрачность дымового шлейфа РДТТ. Данная характеристика обладает той особенностью, что с той или иной степенью достоверности ее можно определять только экспериментально. Схем таких экспериментов может быть несколько. Упомянем из них три:

- 1) эксперименты в дымовой трубе;
- 2) микрофизические исследования продуктов сгорания топлив и ТЗП;
- 3) замер дымообразования в свободной струе.

У всех этих методов имеются свои достоинства и недостатки.

К недостаткам дымовой трубы можно отнести то, что она не универсальна для двигателей разной величины. Труба, в которую истекает газ, воздействует на сам газ: изменяя его температуру по сравнению с той, что на открытом воздухе, снижая скорость перемещения газа по трубе, добавляя туда пыль и т.п.

Вычисление мощности дымообразования двигателя с помощью микрофизического метода предполагает знание не только счетной концентрации и оптической площади твердых продуктов сгорания топлив, ТЗП и бронировок, но и выгоревшую долю этих компонентов, что не всегда возможно определить. Путем взвешивания двигателя до и после прожига можно определить суммарную убыль компонентов, но трудно конкретизировать, сколько было ТЗП, а сколько бронировки.

Поэтому наиболее интересны и, по-видимому, достоверны «чистые опыты», когда мощность дымообразования измеряется прямо в струе РДТТ.

Замер дымообразования в свободной струе обычно используется для двигателей с большим расходом, прожиги которых в относительно

небольших трубах невозможны. Однако при определенной модификации метод может быть распространен и на небольшие двигатели.

Данная методика посвящена измерению мощности дымообразования в струе РДТГ, свободно истекающей в окружающую среду (рисунок 1).

Затопленной струей называется струя, истекающая в неподвижную атмосферу. Мощности дымообразования порохов определяются посредством поперечного просвечивания и сравнения интенсивности светового потока  $I_0$  до работы двигателя и интенсивности светового потока  $I$ , прошедшего на приемник после прохождения через струю. В случае малодымящих порохов разница между исходной и конечной интенсивностью неувеличима, поэтому необходимо многократное прохождение светового потока через струю.

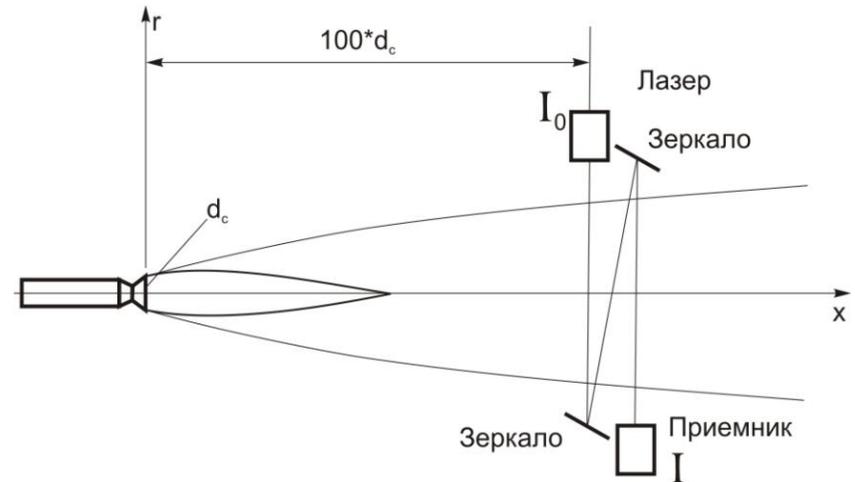


Рис. 1. Схема определения мощности дымообразования в затопленной струе

Мощности дымообразования определяется по следующей формуле:

$$N(t) = \frac{\ln\left(\frac{I_0}{I}\right) V_0 S_c \sqrt{G_2} X}{3\sqrt{\pi} G_1},$$

где  $V_0$  – скорость истечения газа;

$S_c$  – площадь выходного сечения сопла;

$X = 100$  калибров выходного сечения сопла;

$G_1, G_2$  – параметры, зависящие от параметров газа на срезе сопла.

$$G_1 = \frac{d_c^2}{128\varepsilon_0^2}; \quad G_2 = \frac{1}{0,0115 \cdot f_v^2},$$

где  $d_c$  – диаметр выходного сечения сопла.

Коэффициент турбулентной вязкости струи  $\varepsilon_0$  является сложной функцией отношений параметров газа на срезе сопла и в окружающей среде.

$$\varepsilon_0 = 0,005 f_v f_n f_x f_m,$$

где  $f_v$  – функция отношения скорости полета ракеты к скорости газа на срезе сопла,  $u_1/u_0$ ;

$f_n$  – функция отношения давления газа на срезе сопла к давлению газа в окружающей среде,  $p_0/p_1$ ;

$f_x$  – функция отношения плотности газа в окружающей среде к плотности газа на срезе сопла,  $\rho_1/\rho_0$ ;

$f_m$  – функция отношения скорости газа на срезе сопла к местной скорости звука,  $u_0/a_0$  или функция чисел Маха.

Для практических целей данные функции представлены нами в следующем виде:

$$f_v = \exp(-1,63u_1/u_0);$$

$$f_n = \begin{cases} 1,35(p_0/p_1)^{-0,6} & \text{при } p_0/p_1 \geq 2; \\ 1,1 - 0,1(p_0/p_1) & \text{при } p_0/p_1 < 2; \end{cases}$$

$$f_x = 1,02(\rho_1/\rho_0)^{0,44} \quad \text{при } 0,5 \geq \rho_1/\rho_0 \geq 4;$$

$$f_m = 1 - 0,04(u_0/A_0)^{2,3}.$$

Тестовый расчет.

Для примера возьмем гипотетический двигатель с выходным сечением сопла 120 мм и следующими параметрами на срезе сопла:

$$u_0 = 2354 \text{ м/с}; \quad p_0 = 16000 \text{ кг/м}^2; \quad \rho_0 = 0,038 \text{ кг/м}^3.$$

В ходе экспериментов получено ослабление интенсивности светового потока после прохождения через дымовой шлейф в 9 раз, что дает величину мощности дымообразования  $N = 100 \text{ м}^2/\text{с}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Шипунов А.Г., Семашкин Е.Н. Оптические линии связи малогабаритных управляемых ракет в условиях действия помех двигательных установок. – М.: НТЦ «Информтехника», 2000. – 180 с.

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА КОСВЕННОЙ  
ИДЕНТИФИКАЦИИ РАСЧЕТА ЗНАЧЕНИЙ  
СИЛОВОГО ТЕНЗОРА СОПЛОВОГО БЛОКА ПО  
ПАРАМЕТРАМ ИСТЕКАЮЩЕЙ ИЗ НЕГО  
СВЕРХЗВУКОВОЙ НЕСИММЕТРИЧНОЙ  
ГАЗОВОЙ СТРУИ**

***Р.А. ЮРТИКОВ, Н.П. КУЗНЕЦОВ***

*Ижевский государственный технический университет  
имени М.Т. Калашникова*

*т. (3412) 58-53-58, факс:(3412) 50-40-55 e-mail: [info@istu.ru](mailto:info@istu.ru)*

В отечественной практике и за рубежом широкое применение нашла стендовая отработка ракетных двигателей (РД), позволяющая не прибегая к дорогостоящим летным испытаниям, определить характеристики двигателя. При отработке и испытании РД, основной задачей является определение его силового тензора. Наиболее распространенным методом определения составляющих этого тензора является проведение испытаний двигателей на многокомпонентных испытательных стендах.

С появлением высокоэнергетических топлив со значительным содержанием взрывоопасных веществ, чувствительных к внешним воздействиям, проведение стендовых испытаний осложняется, поскольку динамические процессы в такой системе могут быть причиной детонации топливного заряда. [1]

При истечении из соплового блока с регулируемым критическим сечением, формируется несимметричное течение газового потока. Начальный участок несимметричной газовой струи имеет сложную пространственную форму, на ее геометрию влияют следующие основные факторы: геометрия досоплового объема, геометрия соплового раструба, давление в предсопловом объеме и степень открытия критического сечения.

При испытании двигателей, в стендовых условиях обнаруживается значительное влияние каналов замера силовых параметров друг на друга. Еще сложнее взаимовлияние каналов замера проявляется в динамике системы.

Течения в сопловых блоках с нетривиальным критическим сечением в трансзвуковой области могут существенно отличаться от течений в блоках, имеющих классическую геометрию, оказывая сильное влияние на формирование отрывной зоны в сверхзвуковой части, как следствие появляются дополнительные силы, действующие на блок в

целом.

Структура начального участка сверхзвуковой струи напрямую зависит от внутрибаллистических процессов проходящих в РД. Поэтому, геометрия начального участка сверхзвуковой струи является индикатором силовых характеристик РД.

С появлением мощных расчетно-вычислительных комплексов, стало возможно решение пространственных газодинамических задач расчета параметров течения в дозвуковой и сверхзвуковой областях. В настоящее время широкое применение для моделирования вязкого течения однокомпонентного рабочего тела в сопловых блоках находят программные вычислительные комплексы Ansys CFX и Ansys Fluent, основанные на решении системы уравнений Навье-Стокса.

На сегодняшний день достаточно полно изучены процессы, протекающие в каналах РД, в соплах имеющих нетривиальную геометрию, разработаны методы прямой и обратной теории сопла.

Моделирование отрывных течений в сопловых блоках с нетривиальным критическим сечением, с целью выявления их силовых характеристик с использованием современных программно вычислительных комплексов, позволяет качественно повысить уровень начальной стадии проектирования двигателей малой тяги, при этом возникает вопрос о достоверности полученных расчетов.

Большое влияние на точность полученных результатов оказывает выбор модели турбулентности, геометрия конечно-элементной сетки, корректное задание граничных условий и др.

Для подтверждения результатов полученных в ходе выполнения численных расчетов идеальным вариантом, является их сравнение с результатами стендовых испытаний, но поскольку двигатель специального назначения является своего рода «штучным» изделием, и обладает своими динамическими характеристиками, то разработка специального многокомпонентного стенда, является достаточно трудоемкой и дорогостоящей задачей.

С другой стороны подтвердить точность моделирования отрывных течений внутри соплового блока можно по параметрам истекающей сверхзвуковой струи, поскольку формирование ее ударно-волновой структуры во многом происходит за счет течений внутри раструба соплового блока. Тогда, подтвердив идентичность геометрии начального участка струи, полученной в результате численного расчета и с помощью теневой фотографии можно сделать вывод о достоверности результатов численного моделирования.

Для численного моделирования течения газовых потоков по сопловому блоку типа «К» (рисунок 1а), был применен программный комплекс Ansys CFX. При проведении расчетов в качестве модели

турбулентности выбрана модель SST.

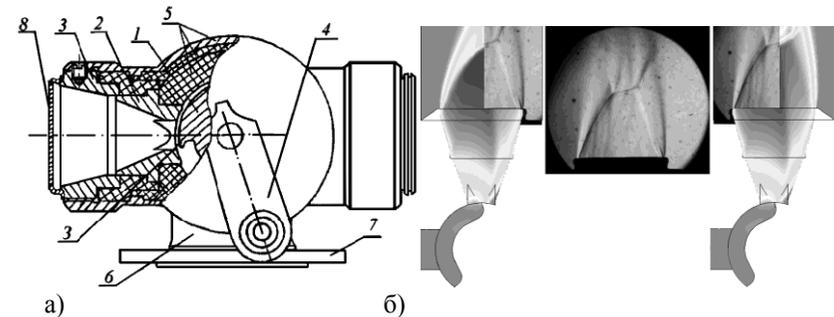


Рис. 1. Пример идентификации сверхзвуковой струи.  
 а – сопловой управляющий блок типа «К» [1], б - теневая фотография несимметричной газовой струи [2] совмещенная с рассчитанной картиной распределения числа Маха.

Расчетная область представляет собой усеченный по оси симметрии сопловой блок типа «К» с присопловой областью для формирования сверхзвуковой струи. Поскольку в данной конструкции соплового блока в рабочем режиме всегда находится только одно из двух сопел, второе сопло в расчетную область не вошло, также при расчете не учитывались утечки рабочего тела.

В качестве рабочего тела выбран воздух, который предполагается вязким и теплопроводным, с показателем адиабаты  $k = 1.4$ . Давление в подводящей магистрали изменялось в пределах от 1МПа до 6МПа с шагом в 1МПа.

В результате сопоставления теневых фотографий [2] полученных в ходе проведения экспериментальных исследований и результатов численного моделирования геометрии ударно-волновой структуры начального участка сверхзвуковой несимметричной газовой струи (рисунок 1б), показана количественная сходимость соответствующих геометрических параметров начального участка.

Таким образом, при соответствии геометрии начального участка сверхзвуковой несимметричной газовой струи полученной методом теневой фотографии, с результатом численного моделирования, можно считать, что расчетное течение внутри соплового блока также соответствует действительному течению, поскольку именно течение внутри соплового блока во многом определяет структуру начального участка сверхзвуковой струи. Следовательно, зная параметры течения газа внутри соплового блока, можно определить расчетным путем все составляющие силового тензора, а именно осевую силу тяги, боковую силу тяги и управляющий момент.

## ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гребенкин В.И., Кузнецов Н.П., Черепов В.И. Силовые характеристики маршевых твердотопливных двигательных установок и двигателей специального назначения. – Ижевск: Изд – во ИжГТУ, 2003 – 356с.

2. Кузнецов Н.П., Юртиков Р.А. Исследование течения газа в сложных каналах (на примере соплового блока типа «К») методом гидрогазоанalogии//«Внутрикамерные процессы и горение в установках на твердом топливе и ствольных системах» Ижевск 29-31 марта 2011г.: сборник трудов. Ижевск: ИПМ УрО РАН, 2011. 316с.

Фундаментальные основы баллистического проектирования  
2012

Секция 9  
Информационные и управляющие  
системы



## ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА КАЧЕСТВО ИЗОБРАЖЕНИЯ, ПОЛУЧАЕМОГО В ЗОНДОВОМ МИКРОСКОПЕ В РЕЖИМЕ АСМ

**М.Т. БИГАЕВА, Н.Ю. ЕФРЕМОВ, Е.А. СЕСИНА**

*Балтийский государственный технический университет*

*190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1*

*т. (812) 259-11-56, E-mail: [sula@bstu.spb.su](mailto:sula@bstu.spb.su)*

Сканирующая зондовая микроскопия является одним из базовых инструментов нанотехнологии. Объектом данной работы является сканирующий зондовый микроскоп (СЗМ) NANOEDUCATOR, принцип работы которого основан на методе постоянного взаимодействия. При сканировании образец перемещается по трем координатам относительно игольчатого зонда, закрепленного в пьезотрубке - кантилере. В режиме атомно-силового микроскопа (АСМ) обеспечивается поддержание постоянной силы взаимодействия зонда и поверхности образца, которая соответствует амплитуде установившихся колебаний зонда в первичной точке контакта с образцом. Получаемое на экране компьютера изображение несет в себе информацию о неровностях поверхности образца, выделяемую из величин перемещений при сканировании.

Под качеством изображения подразумевается изоморфность получаемого изображения реальной поверхности объекта исследования. Поскольку рассматриваемый прибор обеспечивает очень высокое пространственное разрешение (до 3 нм по оси Z и до 10 нм по осям X,Y), на качество изображения влияют малейшие изменения различных влияющих факторов. Среди них можно выделить следующие:

- режимы сканирования (размер области сканирования, шаг, разрешение и скорость сканирования);
- внешние воздействия (помехи и вибрация);
- острота иглы;
- неточное положение образца (поверхность образца не параллельна плоскости сканера).

Влияние на качество группы факторов, относящихся к режимам сканирования, а также возможности стандартных методов обработки изображений для цели устранения искажений были рассмотрены в [1]. Данная работа посвящена исследованию влияния на качество изображения двух последних факторов. Для этого были просканированы стандартные решетки, топология поверхности и размеры типовых элементов которых известны (в частности, решетки типа TGT и TGZ, входящие в комплект СЗМ).

В соответствии с [2], радиус закругления вершины иглы при правильном травлении составляет менее 100 нм. Чем эта величина меньше, тем пространственное разрешение СЗМ выше. Для оценки радиуса закругления наиболее всего подходит решетка TGT1, представляющая из себя массив пиков высотой 300-500 нм с шагом между вершинами 2 мкм. Сечение одного из пиков, выделенного окружностью, представлено на рис.1. Вид и размеры сечения пика у вершины позволяют подтвердить вывод о том, что радиус закругления иглы имеет величину обозначенного порядка.

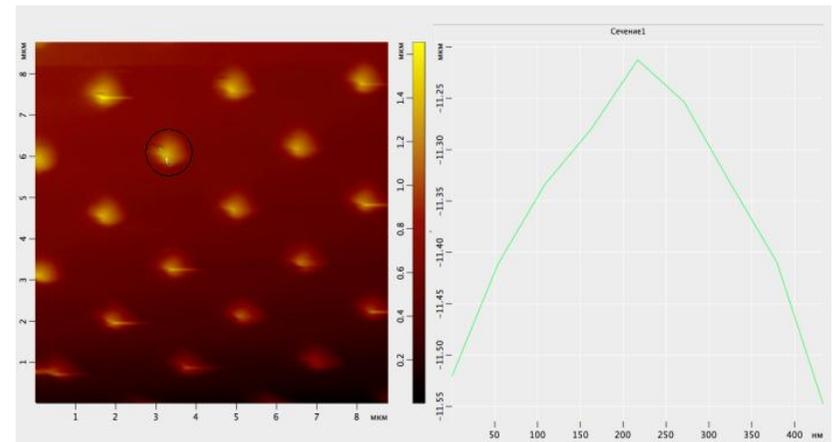


Рис. 1. Сечение отдельного пика на решетке TGT1

Влияние положения поверхности образца относительно плоскости сканера было исследовано на решетках типа TGZ – последовательности прямоугольных полос с шагом 3 мкм. Как видно из 2D-изображений просканированных областей решеток (рис. 2), неточное положение образца относительно плоскости сканера приводит к искажению вида и размеров (уменьшению по отношению к номинальной величине) структурных элементов поверхностей образцов.

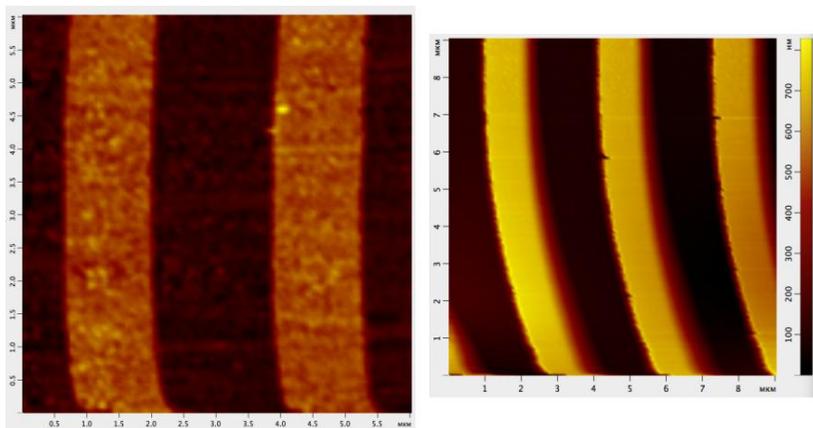


Рис. 2. 2D-изображения решеток TGZ1 и TGZ3

Методы фильтрации полученных изображений позволяют не только удалять «ложные» изображения, но и эффективно осуществлять предварительную обработку изображений для удаления шумовых эффектов, снижающих качество изображения и затрудняющих выделение полезной информации. Последовательным применением методов сглаживания и фильтров резкости удается значительно улучшить качество изображения просканированной области (рис. 3).

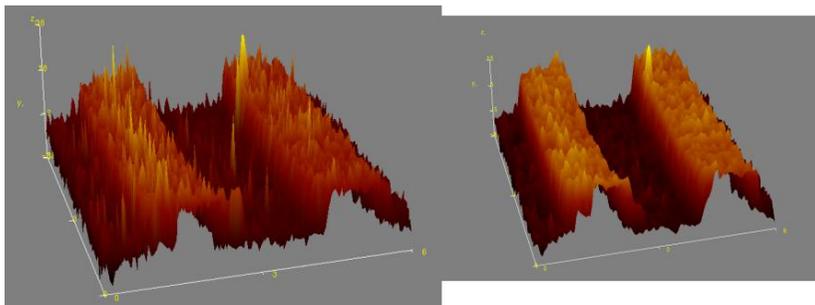


Рис. 3. 3D-изображение решетки TGZ1 до и после применения методов обработки

Таким образом, влияние основных факторов, относящиеся к категории внешних воздействий и характеризующие параметры конкретного прибора и рабочего места, исследовано в необходимом объеме. Выводы о настройках прибора, интерпретации получаемых картин рельефов и возможностях методов обработки, полученные при исследовании стандартных решеток, могут быть использованы для оптимизации качества получаемых на СЗМ изображений.

Поэтому возможен переход к исследованию объектов, морфология поверхности которых неизвестна. К подобным объектам относятся новые функциональные и конструкционные материалы: тонкие пленки (аморфизированные ленточные припои, пленочные магнитные экраны, пленочные сенсоры и мембраны), поверхности элементов конструкций с особыми свойствами (упрочненные, коррозионно- и износостойкие, с пониженным коэффициентом трения, наноструктурированные и др.), мелкодисперсные (микросферические) порошки из неметаллических материалов и сплавов различного назначения.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Бигаева М.Т., Ефремов Н.Ю., Сесина Е.А. Исследование влияния режимов сканирования на качество изображения СЗМ / Молодежь, техника, космос. Труды IV ОМНТК / БГТУ, СПб, 2012 – 380с. с. 116-117.
2. «Сканирующий зондовый микроскоп NanoEducator. Руководство по эксплуатации», «НТ-МДТ», 2010 – 151с.

## **ЦЕНТР ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ – ОСНОВА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО АРТИЛЛЕРИЙСКОГО ВООРУЖЕНИЯ**

**Ю.П. БУРЦЕВ, О.В. ИГНАТЬЕВ, И.А. КРУГЛОВ, В.В. САДОВСКИЙ**

*ОАО «ЦНИИ «Буревестник»*

*603950, г. Нижний Новгород, Сормовское шоссе, 1 а, т. (831) 242-16-08,  
факс (831)241-55-50, E-mail [burevestnik@atnn.ru](mailto:burevestnik@atnn.ru)*

Основное назначение отраслевого центра высокопроизводительных вычислений – обеспечение функционально-ориентированной разработки изделий, оптимизации принимаемых технических решений при отработке образцов АВ и минимизации объемов натурных испытаний.

### **Состав отраслевого центра высокопроизводительных вычислений**

Вычислительный кластер «Минин» с гибридной архитектурой:

- суммарная производительность системы – 57,6 ТФлопс;
- 256 вычислительных узлов, из них:
  - 240 узлов на базе процессоров IntelXeon (2880 ядер - 35,25 ТФлопс);
  - 16 узлов на базе графических ускорителей NVIDIA Tesla (22,37 ТФлопс);
- оперативная память 11,5 Тб, дисковая память 35 Тб, 2 управляющих узла, 3 узла доступа и 3 машины пре и пост обработки.

В составе СуперЭВМ:

- дисковая система хранения данных объемом более 40 Тб с возможностью масштабирования;
- ленточная роботизированная библиотека резервного копирования объемом 180 Тб;
- терминально-демонстрационный зал с оборудованием визуализации;
- система удаленного защищенного доступа для предприятий-пользователей.

Ввод в эксплуатацию – ноябрь 2012 г. Запуск 1-ой очереди (25% мощности) – июнь 2012 г.

Прикладное программное обеспечение предназначено для решения актуальных артиллерийских задач и включает:

Решаемые задачи	Комплексы программ
Внутренняя баллистика (воспламенение и горение, аэродинамика)	ANSYS CFX, GDT
Внешняя баллистика (аэродинамика)	ANSYS CFX, GDT, MSC. Software
Расчет динамического взаимодействия системы «Ствол-снаряд» (высокоскоростная нелинейная динамическая прочность с учетом контактного взаимодействия)	ANSYS Mechanical, LS-DYNA, MSC. Nastran
Динамика машин и механизмов с гидropневматическими амортизаторами и приводами (кинематика, нелинейная динамическая прочность, гидрогазодинамика)	ANSYS Mechanical, ANSYS CFX, LS-DYNA, MSC. ADAMS, MSC. EASY5
Долговечность и живучесть (нелинейная динамическая прочность, трещиностойкость)	MSC. Software, ANSYS Mechanical
Многопараметрическая оптимизация с ограничениями по прочности, ресурсу и др.	Модули программных комплексов

**Услуги отраслевого центра высокопроизводительных вычислений предприятиям отрасли:**

- предоставление вычислительных ресурсов;
- доступ к лицензионным программным комплексам;
- выполнение расчётов;
- консультирование;
- предоставление средств визуализации.

**Преимущества использования отраслевого центра высокопроизводительных вычислений**

- сокращение времени выполнения расчётов;
- возможность решения задач большого объёма;
- решение сложных задач в связанной постановке;
- решение многоцикловых и оптимизационных задач.

**Предприятия получают возможность**

- привлечения вычислительных ресурсов по мере необходимости;
- использования услуг высококвалифицированных расчётчиков;
- получения оперативной консультации;
- экономии трудовых, финансовых и временных ресурсов.

Таким образом, за счет использования СуперЭВМ планируется достичь существенного сокращения сроков разработки новых образцов продукции, что должно обеспечить значительный рост прибыли предприятия.

## ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ МНОГОЦЕЛЕВЫХ ОПЕРАЦИЙ НА СТАНКАХ С ЧПУ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА РОЯ ЧАСТИЦ

**В.Н. ЛЕГКОСТУПОВ**

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»

им. Д. Ф. Устинова

198005, 1-я Красноармейская ул., д. 1

т. 8-(904)-5517125 E-mail [pachek@rambler.ru](mailto:pachek@rambler.ru)

Машинно-вспомогательное время занимает большую долю от оперативного времени затрачиваемого на выполнение технологической операции. Поэтому при комплексной оптимизации производственного процесса сокращение вспомогательного времени на холостые перемещения инструмента и смену инструмента часто дают больший эффект, чем повышение режимов резания.

При проектировании многоцелевой операции с ЧПУ, когда необходимо проводить центрирование, сверление и пр. большого числа отверстий в заготовке, возникает проблема выбора последовательности выполняемых операций и применения инструментов. Задача подобного рода – нахождения оптимальной траектории движения (маршрута), называется *задачей коммивояжера*. Она имеет множество приближенных методов решения. Современный подход к решению подобных задач основан на так называемом роевом интеллекте (Swarm intelligence), в частности, методе роя частиц (Particle Swarm Optimization, далее PSO) [1].

Рассмотрим данный подход на примере обработки детали (рис. 1) на вертикально-фрезерном станке [2].

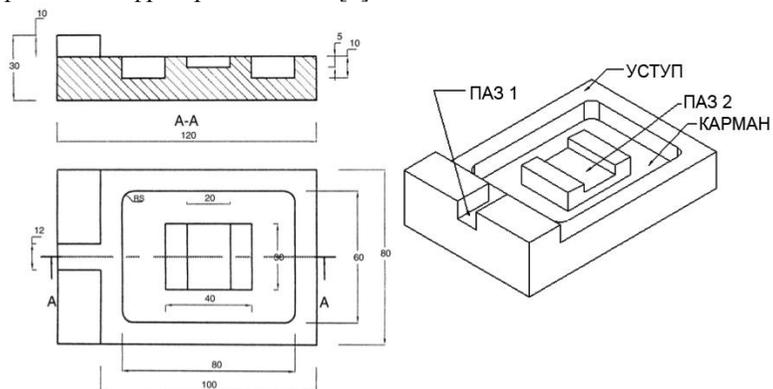


Рис. 1. Эскиз детали

Фрезерование детали производится с помощью трех различных инструментов (табл. 1) в 5 этапов (табл. 2).

Таблица 1

**Исходные данные по инструментам (фрезам)**

№	Тип инструмента	Диаметр, $d$ (мм)	Кол-во зубцов, $z$	Стоимость, у.е.
1	Торцевая фреза	50	6	49,50
2	Концевая фреза	10	4	7,55
3	Концевая фреза	12	4	7,55

Для каждого этапа рассчитана длина траектории  $K$  (мм), описываемой инструментом. На каждую операцию накладываются ограничения по скорости резания и подаче на зуб фрезы.

Таблица 2

**Этапы обработки детали**

№	Тип операции	№ инструмента	Глубина резания, $a$ (мм)	Длина траектории, $K$ (мм)	Скорость резания, м/мин	Подача на зуб фрезы, мм/зуб
1	Фрезер-ие уступа	1	10	450	60-120	0.05-0.4
2	Срезание углов	2	5	90	40-70	0.05-0.5
3	Фрезер-ие кармана	2	10	450	40-70	0.05-0.5
4	Фрезер-ие паза 1	3	10	32	30-50	0.05-0.5
5	Фрезер-ие паза 2	3	5	84	30-50	0.05-0.5

Оптимизация сводится к нахождению максимума целевой функции нормы прибыли  $P$ :

$$P = \frac{S_p - C_u}{T_u} \quad (1)$$

где  $S_p$  – цена продажи изделия;  $C_u$  – стоимость операции – материальные затраты на обработку, включающие в себя стоимость инструмента, стоимость обработки и т.д.;  $T_u$  – время операции, включающее в себя время, затрачиваемое на обработку заготовки, и время, затрачиваемое на подготовительные операции: установку и смену инструмента.

PSO алгоритм моделирует многоагентную систему, где агенты-частицы двигаются к оптимальным решениям, обмениваясь при этом информацией с соседями [3]. Текущее состояние частицы характеризуется координатами в пространстве решений (то есть,

собственно, связанным с ними решением), а также вектором скорости перемещения. Оба этих параметра выбираются случайным образом на этапе инициализации. Кроме того, каждая частица хранит координаты лучшего из найденных ей решений, а также лучшее из пройденных всеми частицами.

На каждой итерации алгоритма направление и длина вектора скорости каждой из частиц изменяются в соответствии со сведениями о найденных оптимумах:

$$v_i = v_i - a_1 \cdot rnd() \cdot (pbest_i - x_i) + a_2 \cdot rnd() \cdot (gbest_i - x_i) \quad (2)$$

где  $v$  – вектор скорости частицы ( $v_i$  – его  $i$ -ая компонента),  $a_1, a_2$  – постоянные ускорения (коэффициенты обучения, обычно  $a_1 = a_2 = 2$ ),  $pbest$  – лучшая найденная частицей точка,  $gbest$  – лучшая точка из пройденных всеми частицами системы,  $x$  – текущее положение частицы, а функция  $rnd()$  возвращает случайное число от 0 до 1 включительно.

После вычисления направления вектора  $v$ , частица перемещается в точку  $x = x + v$ . В случае необходимости, обновляются значения лучших точек для каждой частицы и для всех частиц в целом. После этого цикл повторяется.

Применительно к нашей задаче, значения скорости резания и подачи на зуб фрезы для каждого из 5 этапов обработки определяются по формулам (3)-(4).

$$\text{скорость резания} = V_{\min} + rnd() \cdot (V_{\max} - V_{\min}) \quad (3),$$

$$\text{подача на зуб} = f_{\min} + rnd() \cdot (f_{\max} - f_{\min}) \quad (4),$$

На основе этих значений вычисляют время операций, стоимость операций и норму прибыли. Далее проводят несколько итераций, обновляя значения искомым величин в соответствии с формулой (2). В нашем случае было проведено 45 итераций, однако, наилучшее решение было найдено уже на 31-ой (рис.2).

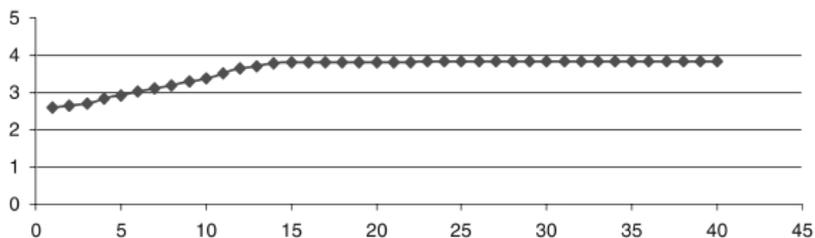


Рис. 2. График найденных решений функции P в зависимости от итерации алгоритма PSO

Таблица 3

**Результаты оптимизации фрезерования детали по методу роя частиц**

№ операции	Скорость резания, м/мин	Подача на зуб, мм/зуб	Стоимость всех операций, $C_{\text{ц}}$ , у.е.	Время операций, $T_{\text{ц}}$ , мин	Норма прибыли, $P$ , у.е./мин
1	119.941	0.400	9.316	4.089	3.836
2	41.642	0.307			
3	40.557	0.406			
4	31.017	0.271			
5	44.311	0.362			

Таблица 4

**Сравнение результатов оптимизации по методу роя частиц и методу возможных направлений Зойтгендейка**

Метод	Стоимость всех операций, $C_{\text{ц}}$ (у.е.)	Время операций, $T_{\text{ц}}$ (мин)	Норма прибыли, $P$ (у.е./мин)
1) PSO	9.316	4.089	3.836
2) Метод возможных направлений	11.35	5.48	2.49

Полученные результаты (табл. 3) показывают высокую эффективность алгоритма PSO, применение которого позволяет существенно сократить общее машинное время. Значения стоимости операций, времени операций и нормы прибыли были определены на основе оптимальных параметров обработки по методу PSO и оказались лучше, чем аналогичные значения, найденные по методу возможных направлений (табл. 4).

**ЛИТЕРАТУРА**

1. *Махов А.А.* Оптимизация в машиностроении – методические рекомендации. – М.: МГТУ «Станкин», 2008.
2. *N. Bascar, P. Asokan.* Optimization of machining parameters for Milling Operation using non-conventional methods – Springer-Vellag London Limited, 2004.
3. Статья «Алгоритм роя частиц» на <http://habrahabr.ru/post/105639/>

## СВЯЗЬ ТОЧНОСТИ ТЕЛЕНАВЕДЕНИЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ РАКЕТ С ОБОБЩЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

**В.И. МОРОЗОВ**

*ОАО «Конструкторское бюро приборостроения»*

*300001, г. Тула, ул. Щегловская засека, 59*

*т. (0872) 41-24-63, факс (0872) 42-61-39, E-mail: [kbkedr@tula.net](mailto:kbkedr@tula.net)*

Анализируются ошибки двумерных (двухканальных) систем теленаведения ракет, состоящих из системы слежения за целью, определяющей положение линии прицеливания (ЛП) относительно точки прицеливания (ТП), и лучевой или командной системы автоматического управления (САУ) ракетой относительно этой линии. Определяется связь ошибок наведения с обобщенными динамическими параметрами САУ.

Точность системы слежения для обоих каналов (индексы «1» или «2») характеризуется двумерным «белым» шумом интенсивности  $N = N_1 + N_2$  с полосой частот  $\pm\omega_x$  и среднеквадратическим отклонением (СКО)  $\sigma_x$  модуля  $|\bar{x}|$  отклонения  $\bar{x} = x_1 + jx_2$  ЛП от ТП, а динамика разомкнутой САУ – частотной характеристикой (ЧХ):

$$W(j\omega) = \begin{cases} -\frac{\omega_C}{\omega} \exp[j(\varphi_3 + \Delta)], & \omega > 0; \\ \frac{\omega_C}{\omega} \exp[-j(\varphi_3 - \Delta)], & \omega < 0, \end{cases}$$

в которой  $j = \sqrt{-1}$ ;  $\omega$  – круговая частота;  $\omega_C$  – модуль частот  $\pm\omega_C$  среза  $W(j\omega)$  по амплитуде, для которых  $|W(j\omega_C)| = 1$ ;  $\varphi_3$  и  $\Delta$  – соответственно полуразность  $\frac{\varphi_3^+ - \varphi_3^-}{2}$  и полусумма  $\frac{\varphi_3^+ + \varphi_3^-}{2}$  запасов устойчивости  $\varphi_3^+$ ,  $\varphi_3^-$  разомкнутой САУ по фазе, для которых  $\varphi_3^+ = \arg W(j\omega_C) + \pi = \varphi_3 + \Delta$  для частот  $\omega > 0$  и  $\varphi_3^- = \arg W(j\omega_C) - \pi = -(\varphi_3 - \Delta)$  – для частот  $\omega < 0$ , то есть  $\varphi_3$  – модуль запасов устойчивости САУ при отсутствии связи (расфазировки) каналов (когда  $\Delta = 0$ ), а  $\Delta$  – расфазировка двумерной САУ.

Такое упрощенное представление динамики САУ только частотой среза  $\omega_C$ , запасом по фазе  $\varphi_3$  и связью каналов  $\Delta$  позволяет на начальном этапе проектирования аналитически исследовать точность систем

теленаведения.

Практика показывает, что данное представление часто оказывается вполне приемлемым для качественного исследования САУ (контуров управления ракетами), у которых в районе частоты  $\pm\omega_C$  среза по амплитуде амплитудные характеристики имеют наклон  $-20\text{дБ/дек}$ , а фазовые – примерно постоянные (при запасе по амплитуде более 6 дБ).

Определение дисперсии  $\sigma_y^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_x}^{\omega_x} |\Phi(j\omega)|^2 N d\omega$  ошибок наведения

на установившемся участке полета основано на представлении квадрата модуля  $|\Phi(j\omega)|^2$  ЧХ  $\Phi(j\omega)$  замкнутой САУ в виде:

$$|\Phi(j\omega)|^2 = \begin{cases} \frac{\omega_C^2}{\omega_C^2 - 2\omega_C\omega \cos(\varphi_3 + \Delta) + \omega^2}, & \omega \geq 0; \\ \frac{\omega_C^2}{\omega_C^2 + 2\omega_C\omega \cos(\varphi_3 - \Delta) + \omega^2}, & \omega < 0. \end{cases}$$

Для принятых допущений связь СКО  $\sigma_y$  модуля  $|\bar{y}|$  комплексного отклонения  $\bar{y} = y_1 + jy_2$  ракеты от ТП с СКО  $\sigma_x$  модуля  $|\bar{x}|$  можно определить коэффициентом  $K = \frac{\sigma_y}{\sigma_x}$  из зависимости

$$K^2 \approx \frac{1}{\mu \sin \varphi'_3} \left[ \frac{\pi}{2} - \varphi'_3 - \arctg \frac{1 - \frac{\mu}{\cos \varphi'_3}}{\text{tg} \varphi'_3} \right],$$

в которой  $\mu = \frac{\omega_x}{\omega_C}$ ;  $\varphi'_3 = \varphi_3(1 - v^2)$  – запас устойчивости САУ, разомкнутой по одному из каналов с учетом связи с другим каналом, где  $v = \frac{\Delta}{\varphi_3}$ .

Для  $\varphi_3 = 20..40^\circ$  и соответственно  $\mu \leq 0,7$  (для  $\varphi_3 = 20^\circ$ ) ... 0,5 (для  $\varphi_3 = 40^\circ$ ) коэффициент  $K$ , который составляет не более 1,6...1,3, практически не зависит от  $v$  при  $0 \leq |v| < 0,7$ , то есть расфазировка  $\Delta$  не оказывает заметного влияния на точность  $\sigma_y$  системы для этих значений  $\mu$  и  $v$ .

При значениях  $0,7 \dots 0,5 \leq \mu \leq 1,0$  коэффициент  $K$  для диапазона  $0 \leq |v| < 0,7$  достигает значений  $2,0 \dots 2,9$  ( $\varphi_3 = 20^\circ$ ) и  $1,4 \dots 2,0$  ( $\varphi_3 = 40^\circ$ ).

Определение дисперсии  $\sigma_h^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_x}^{\omega_x} |\Phi_h(j\omega)|^2 N d\omega$  динамической

ошибки  $\bar{h}$  основано на представлении квадрата модуля  $|\Phi_h(j\omega)|^2$  ЧХ ошибки  $\Phi_h(j\omega) = 1 - \Phi(j\omega)$  в виде:

$$|\Phi_h(j\omega)|^2 = \begin{cases} \frac{\omega^2}{\omega^2 - 2\omega_C \omega \cos(\varphi_3 + \Delta) + \omega_C^2}, \omega \geq 0; \\ \frac{\omega^2}{\omega^2 + 2\omega_C |\omega| \cos(\varphi_3 - \Delta) + \omega_C^2}, \omega < 0. \end{cases}$$

Связь СКО  $\sigma_h$  модуля  $|\bar{h}|$  комплексной динамической ошибки  $\bar{h} = h_1 + jh_2$  с СКО  $\sigma_x$  модуля  $|\bar{x}|$  ошибок системы слежения определяется коэффициентом  $K_h$  из формулы

$$K_h^2 \approx 1 + \frac{1}{\mu \sin \varphi'_3} \left[ \sin 2\varphi'_3 \cdot \ln \sqrt{1 - 2\mu \cos \varphi'_3 + \mu^2} + \cos 2\varphi'_3 \left( \frac{\pi}{2} - \varphi'_3 - \arctg \frac{\cos \varphi'_3 - \mu}{\sin \varphi'_3} \right) \right].$$

Из анализа полученных зависимостей для коэффициентов  $K$  и  $K_h$  следует, что оба они увеличиваются с уменьшением  $\varphi_3$ , ростом  $\mu$  (при  $\mu < 1$ ) и  $|v|$ , что налагает соответствующие ограничения на эти величины (определяющие точность наведения  $\sigma_y$  и размеры поля

управления  $h_{ПУ} \geq \pm 2 \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma_h$ ).

Оценка максимального значения  $h_{\max}$  динамической ошибки в плоскости воздействия скачка скорости [1] основана на представлении вещественной ЧХ  $P(\omega) = \operatorname{Re} \left[ \frac{1}{j\omega} \Phi_h(j\omega) \right]$  для приведенного единичного скачка формулой

$$P(\omega) = \begin{cases} \frac{\omega_C \sin(\varphi_3 + \Delta)}{\omega_C^2 - 2\omega_C \omega \cos(\varphi_3 + \Delta) + \omega^2}, \omega \geq 0; \\ \frac{\omega_C \sin(\varphi_3 - \Delta)}{\omega_C^2 + 2\omega_C \omega \cos(\varphi_3 - \Delta) + \omega^2}, \omega < 0. \end{cases}$$

Из анализа  $P(\omega)$  определяются максимальные ее значения  $P_m^+ = \frac{1}{\sin(\varphi_3 + \Delta)}$  для  $\omega > 0$  и  $P_m^- = \frac{1}{\sin(\varphi_3 - \Delta)}$  для  $\omega < 0$ , по которым оценивается  $h_{\max}$ .

Для участка переходного процесса при встреливании в поле управления при воздействии на САУ с момента  $t=0$  скачка скорости  $x_1 = at \cdot I(t)$  максимальное значение  $h_{1\max}$  динамической ошибки  $h_1(t) = x_1(t) - y_1(t)$  определяется соотношением

$$h_{1\max} \leq \frac{1,18a}{\omega_C} \cdot \frac{2 \sin \varphi_3 \cos \Delta}{\cos 2\Delta - \cos 2\varphi_3},$$

которое для  $\varphi_3 < 60^\circ$ ,  $|\Delta| < \varphi_3$  с погрешностью не более 8% аппроксимируется формулой

$$h_{1\max} \leq \frac{1,18 \cdot a}{\omega_C \sin \varphi_3'}.$$

Эта оценка  $h_{\max}$  является уточнением для одномерных САУ (при  $\Delta=0$ ,  $\varphi_3' = \varphi_3$ ) и обобщением для двумерных систем (при  $\Delta \neq 0$ ,  $\varphi_3' = \varphi_3(1 - v^2)$ ) известных формул [1].

Полученные оценки  $K$ ,  $K_h$ ,  $h_{\max}$  позволяют на начальном этапе проектирования определить, исходя из заданной точности наведения, ориентировочную область изменения рациональных параметров  $\omega_C$ ,  $\varphi_3$ ,  $\Delta$ , от которых, в свою очередь, зависят требования к обобщенным параметрам системы управления ракетой и динамическим характеристикам самой ракеты.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Казамаров А.А., Палатник А.М., Роднянский А.О. Динамика двумерных систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1967. 308с.

## СИСТЕМА УГЛОВОГО СКЛОНЕНИЯ МАЛОГАБАРИТНОЙ РАКЕТЫ ВЕРТИКАЛЬНОГО СТАРТА

**В.И. МОРОЗОВ, И.А. НЕДОСЕКИН, Е.Л. ЛЕОНОВА, А.Н. ГРАНКИН**

*ОАО «Конструкторское бюро приборостроения»*

*300001, г. Тула, ул. Щегловская засека, 59*

*т.(4872) 41-0068, факс (4872) 42-6139, E-mail [kbkedr@tula.net](mailto:kbkedr@tula.net)*

На основании анализа возможных вариантов построения предлагается рациональная динамическая структура системы углового склонения продольной оси малогабаритной вращающейся по углу крена ракеты вертикального старта, построенная на основе твердотельных интегральных микроэлектромеханических датчиков угловых скоростей, трехстепенного гироскопа крена (ГК) и импульсных газореактивных двигателей склонения (ГДС).

Выявлены особенности функционирования ГК на ракете вертикального старта, связанные с большим диапазоном изменения угла тангажа ракеты в процессе ее углового склонения и последующего вывода на линию визирования цели и ограничениями на допустимый угол разворота плоскости внутренней рамки ГК относительно плоскости, перпендикулярной плоскости наружной рамки. Предлагаются технические решения, обеспечивающие работоспособность ГК во всех условиях наведения ракеты на цель.

Рассматривается возможный вариант расположения импульсных ГДС на ракете, а также предлагается динамическая структура формирователя релейного трехпозиционного сигнала управления ГДС.

Приводятся результаты исследования динамики системы углового склонения продольной оси ракеты и последующего ее вывода на линию визирования цели, на основании которых сформированы требования к ее элементам.

## **ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ КОМПЛЕКСОВ ПРИ АВТОНОМНОЙ ПРОВЕРКЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

***К.С. ОСЬКИН***

*ЗАО «Специальное конструкторское бюро»,  
614014 г. Пермь ул. 1905 года, 35  
т. 89127881564, факс (342) 260 57 90, e-mail: [oskin.konstantin@gmail.com](mailto:oskin.konstantin@gmail.com)*

В современных условиях вновь создаваемые комплексы вооружений характеризуется все большим увеличением сложности, а соответственно и стоимости. Достаточно подробно мировые тенденции развития вооружения, в частности реактивных систем залпового огня, изложены в [1].

Для реактивных систем залпового огня (РСЗО) система управления обеспечивает запуск реактивного снаряда (РС) с заданным темпом и отработку циклограммы предстартовой подготовки РС в зависимости от типа боеприпаса. При этом в задачи аппаратуры пуска также входит проведение контроля типа и количества заряженных РС и передача этой информации системам автоматизации верхнего уровня боевой машины.

Вторая особенность электронной аппаратуры боевых машин состоит в том, что все блоки электронной аппаратуры являются встроенными.

Основной особенностью аппаратуры пуска с точки зрения проектирования контрольно-проверочной аппаратуры является наличие множества идентичных контролируемых каналов взаимодействия с РС. Количество таких каналов определяется максимальным количеством РС, загружаемых в боевую машину. При этом, каждый канал характеризуется набором цепей, таких как цепи питания, цепи взаимодействия исполнительных механизмов и цепи информационного взаимодействия. Желательно при организации проверок с использованием автоматизированного стенда одновременно контролировать состояние всех каналов, чтобы однозначно определить наличие межканальных замыканий аппаратуры пуска (АП).

Более того, при проектировании стендов проверки АП приходится учитывать наличие существенных токов по каждому из каналов взаимодействия с РС. Таким образом, токовая нагрузка, пропускаемая через стенд, растет пропорционально числу каналов АП, что представляет определенные трудности при подаче питания на стенд, связанные с необходимостью пропуска больших токов через стенд и рассеиванием тепловой мощности.

Дополнительным требованием к проектируемому стенду является требование эргономичности стенда. Контрольно-проверочная аппаратура должна иметь приемлемые габариты для размещения на одном рабочем месте, а также удобные и интуитивно понятные средства управления контрольной аппаратурой.

Описанные выше проблемы могут быть решены при помощи специализированных программно-аппаратных комплексов. Примером применения таких комплексов могут служить [2, 3]. Однако особенности функционирования блока АП РСЗО накладывают ряд дополнительных требований к стендам автономной проверки.

Аппаратная часть стенда призвана решать проблемы обеспечения питания контролируемой аппаратуры, имитацию входных релейных сигналов аппаратуры и анализ выходных релейных сигналов состояния, имитацию боеприпаса в части задания типа, количества, а также имитации циклограммы. Также задачей аппаратной части является согласование входных и выходных сигналов контролируемой аппаратуры с сигналами стенда, передача на контролируемую аппаратуру сигналов информационного взаимодействия, регистрация и аналогово-цифровое преобразование сигналов циклограммы взаимодействия боевой машины с боеприпасом.

В функции программного комплекса входят управление аппаратной частью стенда, имитация информационного обмена контролируемой аппаратуры с подсистемами верхнего уровня, сбор и интерпретация информации, полученной при тестировании, реализация графического пользовательского интерфейса. При этом программная часть комплекса должна осуществлять хранение собранной информации с возможностью ее воспроизведения в дальнейшем.

Структурные схемы аппаратной и программной частей стенда приведены на рисунках 1 и 2 соответственно.

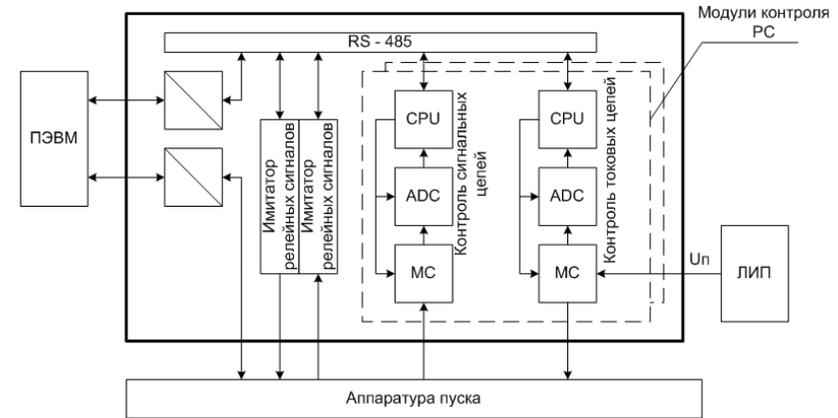


Рис. 1. Структурная схема аппаратной части стенда

В качестве основной конструкции стендов проверки АП целесообразно применять конструкцию, содержащую оригинальный блок контроля, подключаемый к АП и персональную ЭВМ, обеспечивающую управление циклом проверок АП, блоком контроля и аппаратурой пуска.

Выбор такой структуры позволяет гибко конфигурировать набор тестов и дает широкие возможности для создания дружественного интерфейса пользователя в части визуализации результатов контроля АП и управления стендом. Отдельным вопросом проектирования стендового оборудования является организация сетевой и удаленной работы с ним. Следует отметить, что на данный момент развитие сетевых технологий представляет достаточно широкие возможности для решения данной задачи.

Наличие оригинального блока контроля в составе стенда обусловлено тем, что использование стандартных средств автоматизации, таких как, промышленные контроллеры не представляется возможным для решения данной задачи. Необходимость согласовывать входы стандартных средств автоматизации с выходами АП требует проектирования специальных согласующих устройств, а наличие дополнительных согласующих устройств существенно увеличивает габариты стенда.

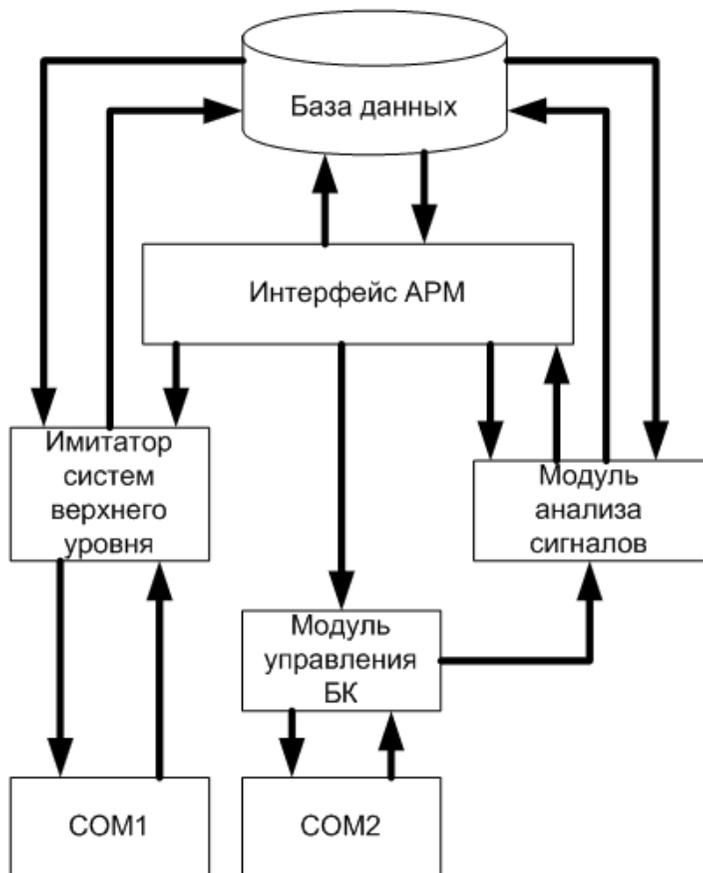


Рис. 2. Структурная схема программной части стенда

Блок контроля помимо согласования входных и выходных цепей реализует подачу питания на контролируемую аппаратуру, эквивалентно штатному подключению, регистрацию времяимпульсных характеристик сигналов циклограммы РС, обеспечивает протекание токовых нагрузок, эквивалентных номинальным, реализует связь ПЭВМ с АП. Конструктивно блок контроля представляет собой электронное устройство, выполненное в отдельном корпусе, внутри которого размещен набор плат, необходимых для организации проверок аппаратуры. Очевидно, что каждая плата из набора должна содержать управляющий микроконтроллер, обеспечивающий управление имитацией циклограммы и измерение по каналу контролируемой аппаратуры.

При описанной реализации управление циклом проверок

осуществляется при помощи ПЭВМ, входящей в состав стенда. Специализированное программное обеспечение автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора реализует управление конфигурацией стенда, имитацию информационного обмена АП с системами автоматизации БМ, сбор и анализ результатов тестирования от блока контроля. Таким образом, участие человека в контроле электронной аппаратуры возможно свести к минимуму, а процесс проверок может быть представлен следующими действиями: подключение стенда согласно схеме подключения, запуск технологической ПЭВМ с ПО АРМ оператора стенда, подача напряжения на стенд, задание конфигурации теста и проведение цикла проверок, получение результатов проверок аппаратуры.

Представленная модель стенда предназначена для выявления таких типов неисправностей как отсутствие электрической цепи, отклонение токовой нагрузки электрической цепи от номинальной, межканальные замыкания, отсутствие информационного обмена по каналам связи. Также стенд автоматизированного тестирования в ряде случаев способен указать место неисправности в тестируемой аппаратуре.

Использование автоматизированных стендов проверки аппаратуры позволяет значительно упростить процесс приемо-сдаточных и периодических испытаний. Кроме того, подобное стендовое оборудование может широко использоваться для ремонта, наладки, а также исследования аппаратуры с целью проведения ресурсных испытаний.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Гуров С.В.* Реактивные системы залпового огня. Обзор. Изд.2, Электронный вариант, DVD-disk, Дата внесения последних изменений 12.12.2009 г. – ФГУП «ГНПП «Сплав», Тула. 2009 г.
2. *Трусов В.М., Тарасов В.В., Киселев В.М.* Способ контроля цепей управления и устройство для его осуществления. Описание изобретения к патенту 2285944, 2006 г.
3. *Пономарев Н.Н., Гоев Н.В., Лушин В.Н., Антонов В.И., Тришкин В.И.* Автоматизированная система контроля. Описание изобретения к патенту 2150730, 2000 г.

## **ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ РАКЕТ**

***С.В. ПОЗДЕЕВ, С.В. КОЛЕСНИЧЕНКО***

*Михайловская военная артиллерийская академия  
195009, г. Санкт-Петербург, ул. Комсомола, 22*

В настоящее время все большее распространение приобретают бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС), которые обладают рядом преимуществ по сравнению с классическими инерциальными навигационными системами (ИНС), имеющими в своем составе гиросtabilизированную платформу (ГСП). К основным преимуществам таких систем можно отнести: отсутствие ГСП, меньшую массу, компактность, относительно низкую стоимость производства.

Применение БИНС как самостоятельной системы не является целесообразным. В первую очередь это связано с неустойчивостью вертикального канала БИНС, которая заключается в неограниченном возрастании ошибки определения вертикальной составляющей скорости летательного аппарата (ЛА), но в целях повышения надежности системы управления, даже в случае комплексирования БИНС с навигационными системами, функционирующими на других принципах, необходимо рассматривать возможность ее функционирования в автономном режиме.

При проектировании БИНС, как и любой другой ИНС, большую важность имеет вопрос точности определения навигационных параметров (НП). Причем, применительно к БИНС, точность функционирования зависит не только от погрешностей измерителей, но и динамики объекта, что в случае высокодинамичного летательного аппарата (ВДЛА) такого как баллистическая ракета придает данному вопросу еще большую актуальность.

Требования к точности БИНС ракет и высокий уровень погрешностей доступных на рынке чувствительных элементов (гироскопов и акселерометров) принуждают к разработке особых алгоритмов построения навигационного решения. Эти алгоритмы часто содержат большое количество численных параметров, оптимальные значения которых существенным образом зависят от динамики носителя, на борту которого предполагается эксплуатация навигационной системы. Таким образом, отладка алгоритмов, повышение их надёжности и точности оказываются возможны лишь после изучения и обработки обширного массива показаний чувствительных элементов, полученных

при натурных испытаниях. Высокая сложность и стоимость таких испытаний привели к идее имитационного моделирования процессов функционирования БИНС. В настоящее время на рынке представлено несколько продуктов для решения этой задачи: программные модули INS Toolbox и GPS Toolbox, разработанные фирмой GPSoft и предназначенные для подключения к математическому пакету Matlab; программно-аппаратный комплекс CAST-3000/4000, предлагаемый компанией CAST Navigation; виртуальная лаборатория NavLab Норвежского оборонного научно-исследовательского центра (FFI). Все перечисленные системы имеют в своей структуре много общего. Они, как правило, включают средства генерации траектории летательного аппарата (с учётом его массогабаритных и аэродинамических характеристик) и соответствующих этой траектории идеализированных показаний гироскопов и акселерометров ИНС и приёмника СНС. Кроме того, системы моделирования содержат отдельный блок имитации погрешностей датчиков и их наложения на идеальные значения измеряемых величин. Состоятельность такого моделирования и, следовательно, его польза для отладки навигационных алгоритмов определяются точностью статистического описания ошибок чувствительных элементов навигационной системы и точностью задания динамики носителя. Погрешности гироскопов и акселерометров часто представляются как сумма постоянного смещения нуля, цветного шума с экспоненциально затухающей корреляционной функцией и белого шума.

Отличием представленной в данной статье модели от известных решений является то, что в качестве исходных данных для генерации траектории движения носителя предлагается использование записей телеметрии носителя, что позволяет сократить число натурных испытаний.

Структурная схема предлагаемой модели имеет вид, изображенный на рисунке 1.

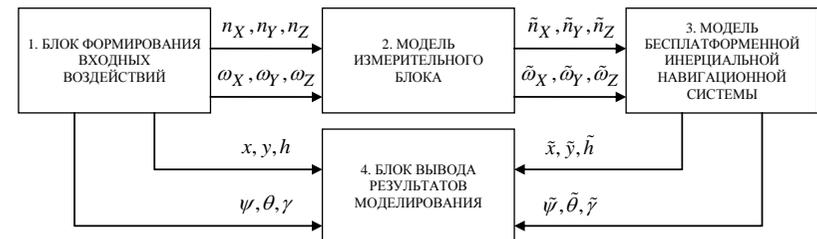


Рис. 1. Структурная схема модели

При разработке модели были приняты следующие допущения:

1. В качестве модели Земли была принята модель WGS-84;
2. Вектор ускорения свободного падения определен безошибочно;
3. Углы перекосов инерциальных чувствительных элементов и систематические составляющие их ошибок определены при калибровке БИНС и скомпенсированы полностью.

*Блок формирования входных воздействий* служит для выработки ускорений и угловых скоростей, которые регистрируются инерциальными датчиками БИНС. Входной информацией данного блока являются записи телеметрии, полученные по результатам натурных испытаний. В общем случае алгоритм функционирования данного блока представляет собой следующую последовательность:

1. Чтение и линейная интерполяция записей телеметрии движения носителя;
2. Численное дифференцирование по времени трех координат объекта;
3. Перепроектирование полученных скоростей из стартовой системы координат в географическую;
4. Численное дифференцирование скоростей в географической системе координат;
5. «Подмешивание» к полученным ускорениям в географической системе координат «вредных» ускорений, определяемых ускорением свободного падения, ускорениями Кориолиса и ускорениями, вызванными криволинейностью движения объекта вдоль сферической поверхности;
6. Перепроектирование полученных ускорений в связанную систему координат;
7. Получение параметров углового движения основано на решении кинематического уравнения относительно параметра  $\Omega$ , который является гиперкомплексным отображением вектора угловой скорости связанного трехгранника.

$$2\dot{\Lambda} = \Lambda \circ \Omega - \Omega_g \circ \Lambda + \Lambda(1 - \Lambda)$$

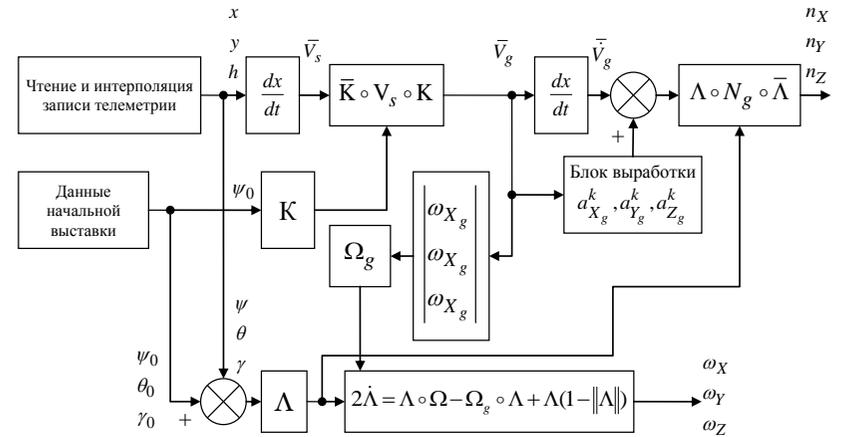


Рис. 2. Функциональная схема блока формирования входных воздействий

В качестве модели идеальной БИНС принята модель с использованием параметров Родрига – Гамильтона или их систематизирующей гиперкомплексной конструкции – кватерниона. Этот выбор обусловлен относительной простотой численной реализации алгоритмов БИНС с использованием вышеуказанных параметров. Кинематические уравнения в параметрах Родрига – Гамильтона линейные, имеют четвертый порядок и в отличие от углов Эйлера – Крылова определены для любых углов рыскания, тангажа и крена.

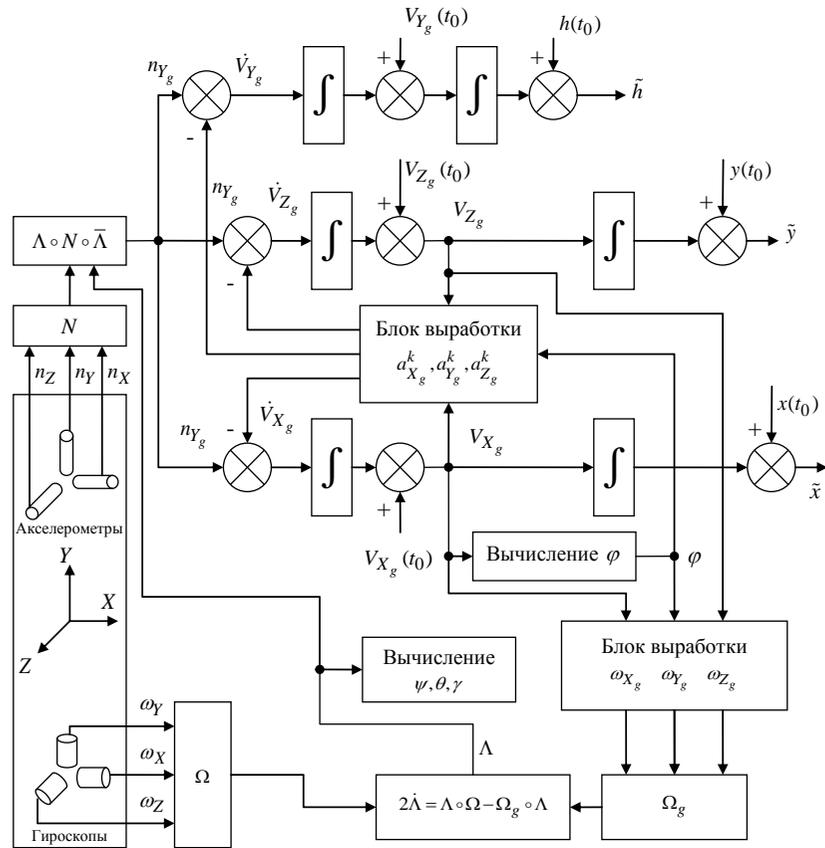


Рис. 3. Модель БИНС, основанная на решении одного кинематического уравнения в кватернионах

Модель инерциальных измерителей служит для ввода ошибок акселерометров и гироскопов. С учетом принятых допущений модель ошибок инерциальных измерителей может быть представлена как сумма полезного сигнала и некоторого шума:

$$\begin{pmatrix} \tilde{n}_X \\ \tilde{n}_Y \\ \tilde{n}_Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_X \\ n_Y \\ n_Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_{aX} \\ n_{aY} \\ n_{aZ} \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} \tilde{\omega}_X \\ \tilde{\omega}_Y \\ \tilde{\omega}_Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_X \\ \omega_Y \\ \omega_Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_{dX} \\ n_{dY} \\ n_{dZ} \end{pmatrix},$$

где  $[n_{dx} \ n_{dy} \ n_{dz}]^T$  и  $[n_{ax} \ n_{ay} \ n_{az}]^T$  – векторы шумов гироскопов и акселерометров.

На практике, при реализации модели, шумовые составляющие

были смоделированы при помощи генератора частотно ограниченного белого шума.

Блок вывода результатов моделирования позволяет производить запись необходимых параметров движения объекта в файл, для их последующей оценки.

Разработанная модель была реализована в среде имитационного моделирования Simulinc матричной лаборатории Matlab.

На рисунках 4,5 приведены график изменения вертикальной составляющей скорости ВДИА и график ошибки ее определения, вызванная шумами гироскопов и акселерометров.

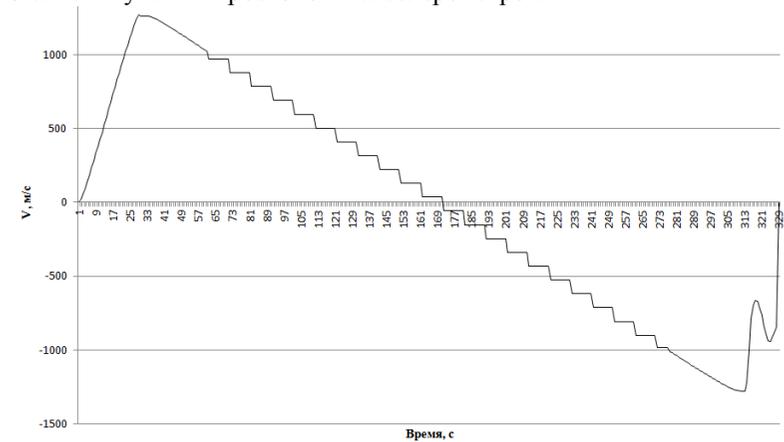


Рис. 4. График изменения вертикальной составляющей скорости

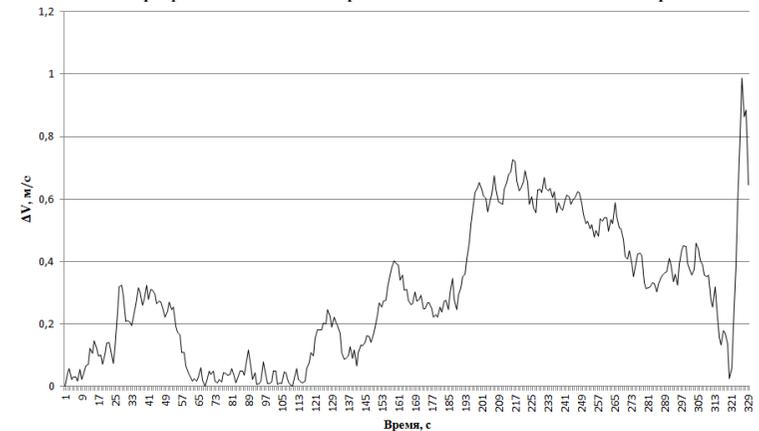


Рис. 5. График изменения ошибки определения вертикальной составляющей скорости

Анализ полученных результатов подтверждает сделанное первоначально предположение о значительном влиянии динамики движения летательного аппарата на ошибку выработки навигационных параметров БИНС.

При заданной динамике движения ЛА конечная ошибка в выработке координат положения объекта не превысила 100 метров при включении шумов акселерометров и 700 метров при включении шумов гироскопов, что позволяет сделать вывод об ограниченной возможности применения БИНС в автономном режиме. Повышение точности определения НП может быть достигнуто фильтрацией сигналов чувствительных элементов или комплексированием БИНС с навигационной системой, работающей на других физических принципах (например, с радионавигационной системой).

В дальнейшем, полученная модель может быть усовершенствована путем добавления модели упругих колебаний корпуса ЛА. Помимо оценки точности инерциальных измерителей могут быть проведены исследования точности алгоритмов определения ускорения свободного падения и влияние на ошибки БИНС используемых в алгоритме БИНС параметров Земли.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Матвеев В.В., Распопов В.Я.* Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб.: ГНЦ РФ ОАО «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. 280 с.
2. *Дьяконов В.П., Круглов В.В.* MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник. СПб.: Питер, 2001. 448 с.

## ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ СЕГМЕНТАЦИИ ПОЛУТОНОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМАХ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

**В.В. СПИРИДОНОВ**

*Балтийский государственный технический университет*

*«ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова*

*190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1*

Целью сегментации изображения в «широком смысле» является разбиение изображения на семантические области, которые имеют строгую корреляцию с объектами или областями наблюдаемой трехмерной сцены. В более узком смысле под сегментацией полутонового изображения понимают задачу разбиения плоскости кадра на ряд связанных непересекающихся областей, каждая из которых обладает некоторой внутренней однородностью того или иного вида (например, однородной

яркостью пикселей).

Пусть вся область кадра обозначается как  $R$ . Тогда *сегментацией изображения* является процесс разбиения  $R$  на такую совокупность связанных областей  $\{R_i\}, i=1..n$ , что для них выполняются следующие основные условия:

- (а)  $R = \cup R_i, i = 1..n$ ,
- (б)  $R_i \cap R_j = \emptyset, i \neq j$ ,
- (в)  $\text{Pred}(R_i) = \text{TRUE}, i=1..n$ ,
- (г)  $\text{Pred}(R_i \cup R_j) = \text{FALSE}, i \neq j$

где  $\text{Pred}(R)$  – булевский предикат однородности области в некотором заданном смысле [1].

Первое условие данного выражения утверждает, что области разбиения целиком покрывают кадр изображения. Второе условие описывает тот факт, что области разбиения попарно не пересекаются. Третье условие требует, чтобы каждая область разбиения была однородной областью изображения в заданном смысле (например, в смысле максимально допустимой разницы значений яркости составляющих ее пикселей). Наконец, четвертое условие требует, чтобы попарное объединение любых двух областей данного разбиения не удовлетворяло тому же условию однородности. В самом деле, если объединение областей также является однородной областью, то эти две области на самом деле являются единой областью, что и следует отразить в разбиении.

Рассмотрим теперь основные методы сегментации изображений, используемые в современном машинном зрении.

#### ***Пороговая и мультипороговая сегментация***

Пороговая сегментация изображения по уровням яркости – простейший вид сегментации изображения. Этот метод основан на том, что многие объекты или области изображения характеризуются постоянной отражательной способностью или поглощением света на их поверхности. Отличительной чертой пороговой сегментации являются вычислительная эффективность и возможность использования в системах реального масштаба времени [2].

Пороговая сегментация выполняется следующим образом:

$$g(i,j) = 1, \text{ для } f(i,j) \geq T,$$

$$g(i,j) = 0, \text{ для } f(i,j) < T,$$

где  $g(i,j)$  – элемент результирующего бинарного изображения,  $f(i,j)$  – элемент исходного изображения.

Существуют следующие основные виды пороговой сегментации.

*Диапазонная пороговая сегментация.* Сегмент изображения с уровнями яркостей из заданного диапазона  $D$  считается «областью», или «фоном», в противном случае.

*Мультипороговая сегментация.* Используется в том случае, если исходное изображение обладает не бимодальной, а мультимодальной гистограммой. В этом случае результирующее изображение не является бинарным.

#### **Методы слияния, разбиения и слияния/разбиения областей**

##### *Слияние областей.*

Описанные выше условия фактически определяют некий итеративный алгоритм *слияния областей*, начинающийся с минимальных областей размером в один пиксель, которые затем в повторяющихся циклах опроса изображения «сливаются» (объединяются) с соседними областями, если для объединенной области выполняется условие  $Pred(Ri) = TRUE$ . Условием останова такого алгоритма слияния служит выполнение всех четырех условий выражения. Это означает, что достигнут такой шаг процесса, на котором больше нельзя найти ни одной пары областей, которые можно было бы подвергнуть слиянию.

Таким образом, приходим к следующему алгоритму сегментации.

*Алгоритм.* Слияние областей (общая структура):

1. Осуществить пресегментацию изображения на «стартовые» области каким-либо неитеративным (однократным) методом.
2. Определить критерий слияния двух соседних областей.
3. Итеративно находить и объединять все пары соседних областей, удовлетворяющие критерию слияния.
4. Если на очередном шаге ни одной пары кандидатов на объединение не найдено – остановиться и выйти из алгоритма.

Различные методы слияния отличаются способом начальной сегментации изображения и критериями слияния. Итоговый результат слияния областей, как правило, существенно зависит от порядка опроса изображения [3].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Писаревский А.Н., Чернявский А.Ф., Афанасьев Г.К. и др. Системы технического зрения. - М.: Машиностроение, 1988.
2. Визильтер Ю.В., Желтов С.Ю., Князь В.А., Ходарев А.Н., Моржин А.В. Обработка и анализ цифровых изображений с примерами на LabVIEW IMAQ Vision. – М.: ДМК, 2008.
3. Hanks John. Counting Particles or Cells Using IMAQ Vision. - National Instruments, 1997.

Фундаментальные основы баллистического проектирования  
2012

Секция 10

Новые компьютерные технологии и  
средства компьютерного моделирования  
при проектировании



## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОПТИМИЗАЦИИ IOSO**

**Ю.И. БАБИЙ**

*ЗАО «СИГМА Технологии»*

*107023, Москва, Электrozаводская ул. д.20,*

*т. (495) 788-10-60, факс (495)788-10-60, E-mail [babiy@iosotech.com](mailto:babiy@iosotech.com)*

Современный уровень развития высокотехнологичных объектов и систем требует использования современных средств и инструментариев при разработке новых, либо модификации современных образцов с целью обеспечения максимально достижимых конкурентоспособных показателей эффективности, т.е. оптимальных по одному, либо совокупности определенных критериев. Стремление обеспечить высокую эффективность объекта, сопряжено с необходимостью оптимального согласования большого числа проектных параметров.

Наличие математических моделей (какими бы полными и точными они не были) является необходимым, но недостаточным условием успешного создания и модификации современных технических систем и объектов. Достижение максимально возможной их эффективности обеспечивается при интеграция математических моделей объектов или систем с поисковыми методами анализа исследования в рамках единой "оптимизационной среды". Как показывает мировой опыт, технологии оптимизации являются мощным инструментарием, позволяющим определять качественно новые технические решения и обеспечивать их высокую эффективность.

Однако, применение традиционных методов оптимизации в решение таких задач представляло значительные трудности, ввиду высокой трудоемкости исследований.

Новая современная технология многокритериальной оптимизации IOSO обладает высокой эффективностью, обеспечивает существенно более широкие возможности и позволяет значительно снизить время, потребное для решения подобных практических задач поиска оптимальных технических решений, в том числе при использовании многопроцессорных вычислительных систем.

Эта особенность технологии IOSO подтверждена результатами широкомасштабного исследования на общеизвестных тестовых функциях, а также сравнительным анализом с современными методами нелинейного программирования. Это обстоятельство позволяет реально

ставить и решать сложные практические задачи оптимизации с большим числом проектных параметров и критериев.

В докладе представлены результаты оптимизационных исследований реальных современных сложных технических объектов области самолето- и двигателестроения в интересах ОКБ «Сухого», НПО «Сатурн», ЦАГИ. Решения оптимизационных задач прочности, газовой динамики, теплопереноса с использованием современных средств моделирования – ANSYS, FlowVision, SolidWork, CFX, FINE/Design3D и других. Приведены примеры задач поиска наилучшей геометрии при многодисциплинарной оптимизации (аэродинамика и прочность) ступени компрессора, позволяющая обеспечить одновременное удовлетворение совокупности требований, предъявляемых к объекту.

Приведены примеры использования инструментария оптимизации IOSO для создания единого вычислительного пространства для решения инженерных задач с эффективным использованием смешанных вычислительных ресурсов, включая многопроцессорные кластера.

## СРЕДСТВА ДЛЯ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК КОНДЕНСИРОВАННЫХ ПРОДУКТОВ У ПОВЕРХНОСТИ ГОРЯЩЕГО ТОПЛИВА

**В.А. БАБУК, А.Н. ИВОНЕНКО**

*Балтийский государственный технический университет «Военмех»  
190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул. д. 1,  
т. (812) 315-15-18, факс (812)316-24-09, E-mail [babuk@peterlink.ru](mailto:babuk@peterlink.ru)*

Непременным компонентом высокоэнергетических твердых ракетных топлив (ТРТ) является металлическое горючее, в качестве которого, как правило, используется алюминий. Следствием применения этого компонента является образование в составе продуктов горения конденсированных продуктов – конденсированных продуктов горения (КПГ). Свойства этих продуктов оказывают существенное влияние на качество системы топливо-двигатель. Они определяют интенсивность процессов шлакообразования в камере, воздействия продуктов сгорания на элементы конструкции, а также уровень потерь удельного импульса тяги.

Образование КПГ осуществляется непосредственно у поверхности горящего топлива, а в дальнейшем имеет место эволюция этих продуктов в составе потока продуктов сгорания. Можно утверждать, что состав топлива оказывает решающее влияние на свойства КПГ и его качество определяется, в том числе, и характеристиками этих продуктов.

Несмотря на многочисленные попытки математического моделирования процесса формирования конденсированных продуктов у поверхности горящего топлива [1], задача прогнозирования свойств КПГ в зависимости от параметров состава топлива и условий горения к настоящему времени не решена. Ситуация во многом аналогична ситуации с моделированием процесса горения и прогнозированием закона скорости горения: выполнены многочисленные работы по моделированию процесса горения, однако практически значимые результаты по определению скорости горения получают только при проведении экспериментальных работ.

При создании системы принятия решений о составе топлив необходима разработка средств, обеспечивающих оценку свойств КПГ в зависимости от рецептурных решений [2]. Эти средства должны затрагивать базы данных и знаний системы, а также средства диалога с пользователем.

В настоящей работе рассматриваются результаты разработки данных средств. Их создание базируется на работах, выполненных в БГТУ по изучению свойств конденсированных продуктов сгорания в

зависимости от состава топлив и условий их горения.

С поверхности горящего топлива конденсированные продукты поставляются в составе двух фракций: агломератов и высокодисперсного оксида (ВДОК). Для характеристики КПП целесообразно получение следующей информации.

1. Доля металлического горючего (МГ) формирующего агломераты ( $Z_m^a$ ). Этот параметр определяет степень вовлеченности МГ в агломерационный процесс.
2. Функции плотности распределения (функции распределения) агломератов ( $f(\delta)$ ) и частиц ВДОК ( $f(d)$ ) по размерам.
3. Массовая доля оксида в составе агломератов ( $\eta$ ).
4. Тип агломератов. (В настоящее время известны четыре типа агломератов: «матричные» агломераты; агломераты с «нашлепкой» окиси ("cap" oxide); полые агломераты; агломераты со сплошной окисной пленкой [3]).

Свойства КПП определяются характеристиками поверхностного слоя горящего топлива, которые в свою очередь определяют закономерности процессов как агломерации, так и формирования высокодисперсного оксида. Учитывая это обстоятельство, уместно воспользоваться результатами работы [4], в которой в зависимости от рецептурных факторов осуществлено выделение типов топлив с близкими закономерностями формирования поверхностного слоя.

1. Топлива на основе неактивного связующего, микродисперсного алюминия и окислителей: перхлората аммония (ПХА), динитрамида аммония (АДНА), нитраминол.
2. Топлива на основе активного связующего, микродисперсного алюминия и окислителей: ПХА, нитраминол.
3. Топлива на основе неактивного связующего, микродисперсного алюминия и окислителей: ПХА, нитрата аммония (НА).
4. Топлива на основе нанодисперсного алюминия и окислителей различного вида.

Для указанных типов топлив может быть осуществлена оценка искомых характеристик.

Эта оценка базируется на использовании ряда процедур: формализованных (модели структуры топлива [5], модели дисперсности агломератов [6]) и неформализованных (экспериментальные данные о характеристиках КПП [3, 7-13]). Данные процедуры содержатся в базе знаний, которая, кроме того, содержит информацию о допущениях, лежащих в основе используемых моделей, точности получения экспериментальной информации, данные других работ.

Разработан программный интерфейс, обеспечивающий при наличии информации о составе топлива и условиях его горения оценку

характеристик КПП. Эти характеристики сопровождаются комментариями о точности оценки.

Состав топлива описывается заданием типа связующего, металлического горючего, окислителя и массовых долей этих компонентов в составе топлива. Для МГ и окислителя также задаются параметры дисперсности. Условия горения определяются давлением ( $P$ ), а также величиной ( $n$ ) и направлением перегрузки. На рис. 1 приводится схема, иллюстрирующая осуществление оценки характеристик КПП.

Результаты выполненной работы можно рассматривать как вклад в создание системы принятия решений о составе высокоэнергетических ТРТ.

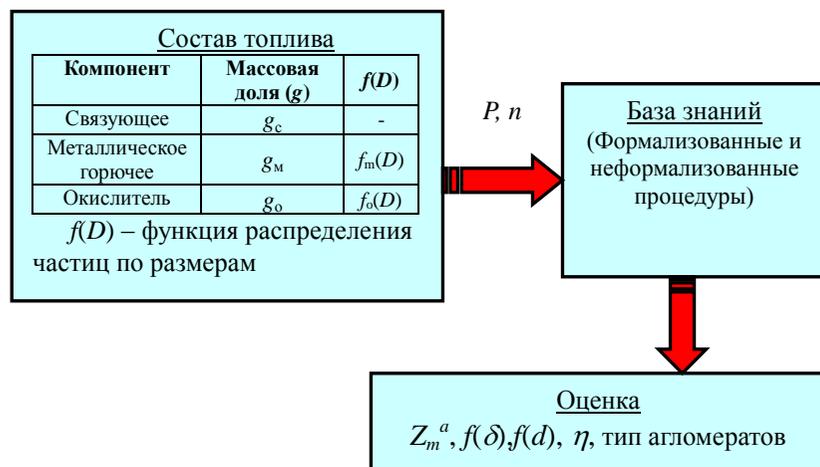


Рис. 1. Блок- схема оценки характеристик КПП

## ЛИТЕРАТУРА

1. Beckstead M.W. An Overview of Aluminum Agglomeration Modeling. In: *Proceedings of 50th Annual Israeli Aerospace Sciences Conference*. Tel Aviv, 2010, pp. 1-28.
2. Бабук В.А., Ивоненко А.Н. Система принятия решений о составе высокоэнергетических ТРТ. Материалы 11-го Всероссийского научно-технического семинара «Артиллерийское вооружение России – 2011», С.-Петербург, БГТУ «Военмех», с. 1-5.
3. Babuk V., Glebov A., Dolotkazin I., Conti A., Galfetti L., De Luca L., Vorozhtsov A. Condensed Combustion Products from Burning of Nanoaluminum-Based Propellants: Properties and Formation Mechanism / *EUCASS Advances in Aerospace Sciences Vol. 1 - Propulsion Physics*, Torus Press, Moscow, Russia, 2009, pp. 3-16.

4. Бабук В.А. Свойства поверхностного слоя и закономерности горения металлизированных твердых топлив // Физика горения и взрыва. 2009, Т. 45, № 4, с. 156-165.
5. Бабук В.А., Васильев В.А., Свиридов В.В. Моделирование структуры смешанного твердого ракетного топлива // Физика горения и взрыва. 1999, Т. 35, №2, с. 35-40.
6. Бабук В.А., Долотказин И.Н., Свиридов В.В. Моделирование дисперсности агломератов при горении алюминизированных твердых топлив // Физика горения и взрыва. 2003, Т. 39, №2, с. 86-96.
7. Babuk, V.A., Vasilyev, V.A., and Malakhov, M.S. Condensed Combustion Products at the Burning Surface of Aluminized Solid Propellant // *Journal of Propulsion and Power*. 1999, V. 15, No. 6, pp. 783-794.
8. Babuk, V.A., Vasilyev, V.A., and Sviridov, V.V. «Formation of Condensed Combustion Products at the Burning Surface of Solid Rocket Propellant,» In: «Solid Propellant Chemistry, Combustion, and Motor Interior Ballistics», edited by V. Yang, T. B. Brill, and W. Z. Ren, Vol. 185, *Progress in Astronautics and Aeronautics*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, VA, July, 2000, Chapter 2.21, pp. 749-776.
9. Babuk V.A., Vasilyev V.A., Glebov A.A., Dolotkazin I.N., Galeotta M., and DeLuca L.T., “Combustion Mechanisms of AN-Based Aluminized Solid Rocket propellants”, In: “*Novel Energetic Materials and Applications*”, edited by L.T. DeLuca, L. Galfetti, and R.A. Pesce-Rodriguez, Grafiche GSS, Bergamo, Italy, Dec. 2004, paper 44, pp. 44-1 – 44-20.
10. Valery A. Babuk, Ildar N. Dolotkazin, Andrey A. Glebov. Burning Mechanism of Aluminized Solid Rocket Propellants Based on Energetic Binders // *Propellants, Explosives and Pyrotechnics*. 2005, V. 30, No 4, pp. 281-290.
11. Бабук В.А. Проблемы исследования образования высокодисперсного оксида при горении алюминизированных твердых топлив // Физика горения и взрыва. 2007, Т. 43, №1, с. 45-53.
12. Бабук В.А., Васильев В.А., Потехин А.Н. Экспериментальное исследование процесса агломерации при горении алюминизированных твердых топлив в поле перегрузок // Физика горения и взрыва. 2009, Т. 45, №1, с. 38-46.
13. Valery Babuk, Ildar Dolotkazin, Alexey Gamsov, Andrey Glebov, Luigi T. DeLuca, and Luciano Galfetti. Nanoaluminum as a Solid Propellant Fuel // *Journal of Propulsion and Power*. 2009, V. 25, No. 2, pp. 482-489.

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАЖИГАНИЯ КОНДЕНСИРОВАННОГО ЗАРЯДА БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ МОЩНЫМ ИМПУЛЬСОМ ИЗЛУЧЕНИЯ**

***В.В. БУРКИН, Р.С. БУРКИНА, А.М. ДОМУХОВСКИЙ***

*НИИ прикладной математики и механики*

*Томского государственного университета,*

*634050, Томск, просп. Ленина, д. 36,*

*т.(3822)529674, факс (3822)529648, E-mail roza@ftf.tsu.ru*

Для интенсификации зажигания зарядов баллистической установки, а также компенсации их температурного градиента наиболее перспективным направлением является использование излучения электроразрядной плазмы. При высоковольтном разряде, инициируемым проволочным или фольговым мостиком, в метательном веществе заряда образуется плазменная дуга, излучение которой приводит к зажиганию заряда. Этот способ инициирования и последующей интенсификации горения зарядов является ключевым в электротермохимической (ЭТХ) технологии метания. К настоящему времени за рубежом и в отечественных исследованиях достигнут значительный прогресс в решении ряда задач внутренней баллистики с применением ЭТХ-технологии [1-5].

В данной работе основное внимание уделено разработке математической модели зажигания конденсированного реакционноспособного вещества (КРВ) при воздействии на него мощного импульса излучения, который генерирует плазма электрического разряда.

Воздействие мощного импульса излучения на поверхность конденсированного вещества может вызывать сложные структурные изменения его приповерхностного слоя. Возможны разрушение и растрескивание приповерхностного слоя, возникновение эрозионного потока с поверхности вещества, испарение, плавление легкоплавкой компоненты в пористой многокомпонентной структуре, изменение пористости и газопроницаемости, зарождение и развитие внутри вещества высокотемпературных очагов. Структурные изменения вещества приводят к качественно новым закономерностям его инициирования и горения. Математическое моделирование позволяет выявить основные закономерности образования переходного слоя между плазмой и КРВ и оценить влияние механизмов разрушения поверхности КРВ на его зажигание.

Рассматривается конденсированное реакционноспособное

вещество, в котором в качестве проводящего мостика, инициирующего разряд, расположена плоская фольга [4]. Электровзрыв фольги и последующий разряд в продуктах электровзрыва образуют в КРВ электроразрядную плазму. Область, занятая электроразрядной плазмой, моделируется плоским слоем. Схема процесса показана на рисунке.

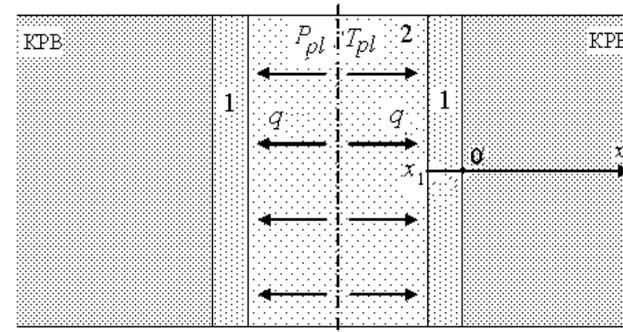


Схема теплового воздействия: 1 – переходный слой,  
2 – излучающая электроразрядная полость,  
КРВ – конденсированное реакционноспособное вещество

Тепловое излучение из электроразрядной полости воздействует на граничащую с ней поверхность КРВ. В модели процесса полагается, что КРВ непрозрачно и первоначально поток излучения из электроразрядной полости поглощается поверхностью КРВ. По конденсированному веществу тепло распространяется за счет теплопроводности. При достижении критерия разрушения происходит разрушение приповерхностного слоя КРВ, и продукты разрушения образуют переходный слой между КРВ и электроразрядной полостью. Этот процесс рассматривается как эндотермический. Влияние продуктов электровзрыва фольги на формирование переходного слоя не учитывается. Считается, что плотность вещества образующегося переходного слоя пропорциональна давлению в электроразрядной области. Образующийся переходный слой защищает КРВ от излучения из электроразрядной полости, частично поглощая его по закону Бугера. Тепло в переходном слое распространяется по теплопроводному механизму. Между переходным слоем и КРВ имеет место идеальный тепловой контакт. Для упрощения модели полагается, что химический процесс проходит в КРВ по кинетике простой реакции с Аррениусовской зависимостью скорости от температуры. Продукты химического процесса твердые. В случае достаточной энергии разряда происходит значительный разогрев переходного слоя и КРВ, и реализуется заживание КРВ.

Расчет параметров теплового воздействия на конденсированное вещество из области электроразрядной плазмы при электровзрыве проводился аналогично [4, 5]. Тепловое излучение из разрядной полости находилось из закона Стефана – Больцмана. Электротехнические параметры находились из уравнений разрядной цепи. Зависимости давления и объема разрядной полости, сформированной в конденсированном веществе заряда, рассчитывались из уравнения энергобаланса полости при решении гидродинамической части задачи [5].

Задача решалась численно. Уравнения тепловой части модели интегрировалась по неявной разностной схеме с использованием четырех точечного шаблона. Для решения разностных уравнений теплопроводности использовался метод прогонки. Уравнения кинетики и неразрывности решались сквозным счетом. За время зажигания принимался момент резкого роста температуры в КРВ, после которого по КРВ распространялась волна горения. Гидродинамическая часть модели решалась сквозным методом с использованием искусственной вязкости. Точность численного решения задачи определялась изменением пространственного шага и чисел Куранта. Выбор счетных параметров обеспечивал точность расчета не хуже 3%.

Рассматривались два критерия разрушения. Первый связан с достижением веществом температуры разрушения. Такой критерий характерен для разрушения приповерхностного слоя, вызванного испарением вещества. Второй критерий разрушения определялся по достижению критического градиента температуры в КРВ, что характерно для механического разрушения поверхности возникающими напряжениями в КРВ.

Анализ результатов численного исследования рассматриваемой задачи показал, что в зависимости от используемого критерия разрушения, плотности мощности и длительности импульса излучения, а также параметров переходного слоя реализуются три режима протекания процесса: устойчивый режим зажигания, неустойчивый и когда зажигание совсем не происходит. Наиболее сильно на режим и параметры зажигания оказывают плотность мощности и плотность энергии импульса излучения из разрядной полости, которые, прежде всего, зависят от параметров разрядной цепи.

Выполненное параметрическое исследование с использованием разработанной математической модели приводит к следующим выводам.

1. Образование переходного слоя у поверхности КРВ при воздействии на него мощного импульса излучения качественно влияет на инициирование КРВ, увеличивает время зажигания, и при большом росте

переходного слоя зажигание КРВ не происходит.

2. Закономерности роста переходного слоя у поверхности КРВ определяются механизмами разрушения КРВ (критерияльными соотношениями) и свойствами (теплоемкостью и прозрачностью) вещества переходного слоя.

3. Режим прохождения процесса и параметры зажигания зависят от формы и динамических характеристик импульса излучения.

*Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (код проекта № 11-03-00136-а).*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Woodley C.R., Billett S.J. Modeling Enhanced Gas Generation Rates in a 155-mm ETC Gun // IEEE Transactions on Magnetics. Vol. 37. № 1, 2001. P. 207–210.
2. Барышев М.С., Бураков В.А., Буркин В.В., Иценко А.Н., Касимов В.З., Саморокова Н.М., Хоменко Ю.П., Широков В.М. Применение плазмотрона для инициирования зарядов баллистических установок// Химическая физика и мезоскопия. 2006. Т. 8, № 1. С. 46-52.
3. Барышев М.С., Бураков В.А., Буркин В.В., Иценко А.Н., Касимов В.З., Саморокова Н.М., Хоменко Ю.П., Широков В.М. Разработка импульсных плазмотронов и опыт их применения для насыпных зарядов в баллистических экспериментах // Химическая физика и мезоскопия. 2009. Т. 11, № 2. С. 147-152.
4. Буркин В.В., Буркина Р.С. Сравнение параметров зажигания конденсированных зарядов термохимическим и электроплазменным воздействиями// Химическая физика и мезоскопия. 2006. Т. 8, № 1. С. 104-113.
5. Буркин В.В., Буркина Р.С., Домуховский А.М. Анализ условий минимизации энергии разряда при электроплазменном инициировании конденсированных реакционноспособных веществ// Химическая физика и мезоскопия. 2009. Т. 11, № 1. С. 14-21.

## МЕТОД ОБОСНОВАНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ПРОЕКТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ БАЛЛИСТИЧЕСКОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ОПЕРАТИВНО-ТАКТИЧЕСКИХ И ТАКТИЧЕСКИХ РАКЕТ

**В.Ф. ВАСИЛЬЕВ**

*Михайловская военная артиллерийская академия  
195009, г.Санкт-Петербург, ул.Комсомола, 22*

Метод обоснования значений проектных параметров при баллистическом проектировании оперативно-тактических и тактических ракет заключается в следующем:

1. В техническом задании на проектирование ракетносителя тактического или оперативно-тактического назначения заказчик в лице Министерства обороны определяет массу полезной нагрузки и максимальную дальность, на которую необходимо ее доставить. Кроме того там же могут быть указаны ограничения по габаритам изделия, требования по преодолению ПРО противника, надежности, унификации и другие требования и ограничения.

2. Разработчик ракетносителя производит первичный выбор типа ракетного топлива, конструктивно-компоновочной схемы, материалов для изготовления корпусов отсеков, тип старта ракеты. Значения проектных параметров выбираются не в абсолютных значениях, а в виде диапазона их изменения, исходя из опыта и сложившихся в данном конструкторском бюро традиций.

3. Исходя из требований по преодолению ПРО противника формируется вид траектории полета или набор возможных траекторий полета к одной цели.

4. Определяется необходимость в механизмах настройки ракетного двигателя и использования тормозных колец.

5. Далее разработчиком назначаются значения проектных параметров по верхней или нижней границе диапазона. Значения давления на срезе сопла -  $p_a$ , начальной тяговооруженности -  $n_0$ , относительного удлинения заряда  $\bar{l}_3$  фиксируются и проводится исследование функции  $m_0 = f(p_k)$  на экстремум. При минимальном значении стартовой массы фиксируется соответствующее ему значение давления в камере сгорания -  $p_k^{opt}$ .

6. Следующим шагом проводится исследование на экстремум функции  $m_0 = f(p_a)$ , при фиксированных  $n_0$ ,  $\bar{l}_3$  и  $p_k^{opt}$ . При

минимальном значении стартовой массы фиксируется  $p_a^{opt}$ .

7. Аналогично проводится исследование функции  $m_0 = f(n_0)$ , при  $p_k^{opt}$ ,  $p_a^{opt}$  и фиксированном  $\bar{l}_3$ . И функции  $m_0 = f(\bar{l}_3)$ , при  $p_k^{opt}$ ,  $p_a^{opt}$  и  $\bar{l}_3^{opt}$ .

8. После получения наиболее выгодных значений проектных параметров при необходимости может быть проведено второе и более приближение по пунктам 5 - 7.

Графически метод обоснования значение проектных параметров представлен на рис. 1.

Таким образом, разработанный метод позволяет провести обоснованный выбор значений проектных параметров, с учетом их взаимного влияния, оптимизация значений проектных параметров проводится по критерию минимальной стартовой массы ракеты. Данный метод позволяет снизить степень риска принятия не правильного решения на начальных этапах проектирования. В целях автоматизации процесса проектного поиска следующим шагом должна быть разработка алгоритма и программы расчета стартовой массы ракеты.

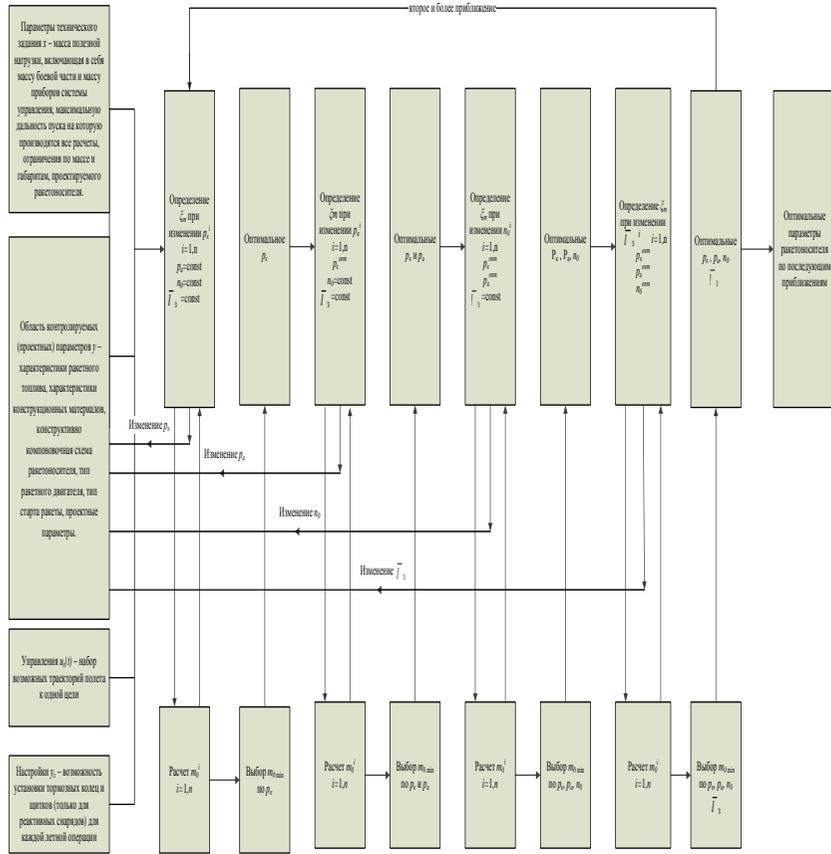


Рис. 1. Метод обоснования значений проектных параметров при баллистическом проектировании оперативно-тактических и тактических ракет

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА  
ЭЛЕМЕНТЫ ИЗДЕЛИЙ  
РАКЕТНОЙ И АРТИЛЛЕРИЙСКОЙ ТЕХНИКИ  
ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*А.Н. ГАРАЩЕНКО, М.Н. СЛИТКОВ, В.П. РУДЗИНСКИЙ*

*ОАО «ЦНИИ специального машиностроения»  
141350, Хотьково, Московской обл., ул. Заводская  
т./факс (495)786-22-68, E-mail [a.n.gar@mail.ru](mailto:a.n.gar@mail.ru)*

Проектирование изделий ракетной и артиллерийской техники производится с учетом высокотемпературных воздействий на различные элементы, многие из которых изготавливаются из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Из таких материалов изготавливаются корпуса двигателей на твердом топливе, пусковые контейнеры и стаканы для ракетных комплексов, пусковые трубчатые направляющие для ракетно-артиллерийского вооружения, контейнеры и бункеры для хранения и транспортировки изделий, оборудования и пр.

Основным источником таких воздействий является высокотемпературный газовый поток, воздействующий на поверхность корпусов двигателей, на внутреннюю поверхность пусковых контейнеров, стаканов, труб, на наружную поверхность элементов стартового комплекса, и контейнеров различного назначения. Кроме того, при проектировании некоторых изделий (контейнеры, бункеры, тара для снарядов и др.) необходимо учитывать возможность воздействия на них пламени пожара.

Для расчетов температурных полей в конструктивных элементах из ПКМ и в покрытиях, используемых для их теплозащиты или огнезащиты, используются разработанные авторами методики и компьютерные программы, учитывающие все основные физико-химические процессы, происходящие в материалах при высокотемпературных воздействиях. При расчетах хорошо зарекомендовали себя программные комплексы «ТЕПЛОЗАЩИТА» и «ОГНЕЗАЩИТА», которые были представлены на предыдущей конференции и позволяют моделировать прогрев и определять проектные толщины средств защиты от высокотемпературного воздействия. Несмотря на наличие ряда известных зарубежных и отечественных программных комплексов, применение указанных методик и программ во многих случаях оказывается более приемлемым, поскольку они лучше учитывают специфику конкретных материалов, отличающихся сложным поведением при нагреве.

В докладе рассмотрены некоторые особенности моделирования и

проектирования тепло- и огнезащиты для конкретных изделий и их элементов. Например, важность компьютерного моделирования прогрева корпусов из ПКМ обусловлена необходимостью повышения точности определения проектных толщин теплозащиты, вес которой составляет существенную долю от веса корпуса и двигателя в целом, а также необходимостью надежного определения температурных полей в оболочке корпуса, существенно влияющих на его напряженно-деформированное состояние и вес. Результаты моделирования динамики продвижения фронта деструкции внутренней теплозащиты и изменения количества продуктов термического разложения может использоваться при уточнении баллистических параметров изделий.

Моделирование прогрева пусковых контейнеров и стаканов из ПКМ позволяет оценить возможность отслоения слоев оболочки, а также воспламенения оболочки в период после окончания интенсивного воздействия после старта изделия. Это позволяет выбрать рациональный вариант теплозащиты. Эффективность такого подхода и точность проведения расчетов по используемым методикам подтверждена результатами сопоставления их результатов с результатами измерения температуры и глубин продвижения фронта деструкции в материалах оболочек при огневых испытаниях натуральных изделий.

Особенностью моделирования высокотемпературных воздействий и теплового состояния трубчатых пусковых направляющих из КПМ является определение параметров воздействия на всех этапах пуска изделий. Расчет проводится с учетом газодинамических параметров на срезе соплового блока изделия и кинематики его движения по направляющей, а также по мере удаления от нее. Рассматриваются параметры газового потока в трубе и свободной сверхзвуковой струи после выхода из нее изделия. С учетом этих параметров определяются зависимости от времени интенсивности теплового воздействия на внутреннюю поверхность для различных сечений трубы. Рассчитываются температурные поля в оболочке пусковых труб и толщина теплозащитного слоя. Возможен учет многократных пусков (темпа стрельбы), а также учет перераспределения и накопления тепла в оболочке.

С помощью программного комплекса «ОГНЕЗАЩИТА» производится моделирование огневого воздействия и теплового состояния изделий и элементов из КПМ при пожаре.

Таким образом, разработанные методики и программы показали себя эффективным инструментом для компьютерного моделирования прогрева и тепло- огнезащиты различных изделий и элементов из ПКМ. Достоверность и эффективность подобных расчетов подтверждена многочисленными модельными и натурными испытаниями изделий.

## ОБНОВЛЕННАЯ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БАЗА ИЗГОТОВЛЕНИЯ НИТРАТОВ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ И ПОРОХОВ

**Х.З. ГИНИЯТОВ, И.М. САМИТОВ, В.Г. БОРБУЗАНОВ,  
Е.Л. МАТУХИН**

*Федеральное казенное предприятие  
«Казанский государственный казенный пороховой завод»  
420 032, г.Казань, ул.1 Мая,14  
Тел. (843) – 554-34-20; факс(843)-554-40-14;  
E-mail: [kazanpowder@KGTS.ru](mailto:kazanpowder@KGTS.ru)*

**Федеральное казенное предприятие «Казанский Государственный казенный пороховой завод»** (ФКП «КГ КПЗ»), являясь правопреемником Государственного казенного научно - производственного предприятия им. В.И. Ленина (ГК НПП им В.И.Ленина), осуществляет свою деятельность на основании распоряжения Правительства Российской Федерации от 26 августа 2002 года № 1181-р в качестве унитарного предприятия, основанного на праве оперативного управления. Свой статус «Казенного и государственного» предприятие получило первым среди Российских пороховых заводов.

Завод создан в целях производства пироксилиновых порохов, пороховых зарядов и боеприпасов, выполнения работ и оказания услуг в области их разработки, производства, реализации, ремонта, хранения и утилизации и является ведущим и крупнейшим в России производителем порохов, метательных зарядов и боеприпасов для многих видов вооружения Российской Армии.

Предприятие является единственным пороховым заводом России, вступившим в Европейскую ассоциацию производителей нитратов целлюлозы (ЕНА), которая входит в качестве структурного подразделения во Всемирную ассоциацию производителей нитроцеллюлозы (WONIPA).

В настоящее время Федеральное казенное предприятие «Казанский государственный казенный пороховой завод» выпускает пироксилиновые пороха и заряды для танковой и полевой артиллерии, морским и авиационным системам, средствам ближнего боя (гранатометам, в том числе «щеточные» изделия), малокалиберной артиллерии, стрелковым системам (пулеметам, автоматам, пистолетам и др.) и является универсальным заводом Российской Федерации по изготовлению пироксилиновых порохов (более 110 номенклатур).

С целью реконструкции и модернизации производства Федеральное казенное предприятие «Казанский государственный казенный пороховой завод» с 2002 года **участвует в реализации**

**инвестиционных (инновационных) проектов по Федеральным целевым программам** «Реформирование и развитие оборонно-промышленного комплекса на 2002-2006 г.г.», «Развитие оборонно-промышленного комплекса на 2007...2010 годы и на период до 2015 года», «Развитие оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации на 2011-2020 годы».

Технология изготовления нитратов целлюлозы (НЦ) – полимерной основы пироксилиновых, баллистических и сферических порохов, а также твердых ракетных топлив в значительной мере определяет современный уровень развития боеприпасов различного назначения. Во второй половине 80-х и в 90-е годы прошлого века в нашей стране в силу ряда объективных и субъективных причин практически не проводились работы по совершенствованию технологии и оборудования предприятий, на которых выпускаются основные виды НЦ. Наметилось отставание отечественного производства пироксилиновых порохов от уровня развитых стран в связи с проведенными зарубежными разработками по созданию порохов и зарядов нового поколения на современной технологической базе.

Необходимость восстановления и технического перевооружения производства порохов и нитратов целлюлозы вызвана моральным и физическим износом устаревшего оборудования, необходимостью повышения уровня безопасности процессов и выводом обслуживающего персонала из опасных производственных зон, оптимизацией количества используемого оборудования и производственных площадей, повышением качества выпускаемой продукции.

В рамках реконструкции и технического перевооружения **производства нитратов целлюлозы** проведены:

Восстановление складов азотной и серной кислот производства НЦ и участка переработки отработанных кислотных смесей.

Создан и осваивается производственный комплекс непрерывной нитрации целлюлозы на базе молотковой мельницы для разволокнения целлюлозного сырья в уплотненной физической форме «папка», нитроагрегата, кислотоотжимочных пульсирующих центрифуг Р-80 и ½ ФГП, с комплексом автоматики и управления. Внедрение молотковой мельницы на операции подготовки сырья для разволокнения листовой целлюлозы значительно расширило технологические возможности производства в переработке различных форм целлюлозного сырья, повысило производительность труда, снизило трудоемкость процесса на данном участке, обеспечило вывод обслуживающего персонала из наиболее опасных производственных зон, связанных с непосредственным контактом с нестабилизированным нитропродуктом и кислотными смесями высокой концентрации.

Впервые в России освоен комплекс непрерывного совмещенного спиртоводоотжима нитратов целлюлозы на основе центрифуги Р-80, совмещающей две операции (водоотжима и спиртового обезвоживания) в одном аппарате для замены существующих процессов водоотжима и обезвоживания, осуществляемых в отдельных зданиях на центрифугах периодического действия.

В рамках программы «Реконструкция и техническое перевооружение **производства пироксилиновых порохов**» проведена реконструкция и техническое перевооружение технологической линии по изготовлению мелко- и среднезернистых пироксилиновых порохов

Внедрение технологического комплекса разработки ФКП «КГ КПЗ» непрерывно – действующих аппаратов на операциях проявлявания, классификации и вымачивания позволило сократить технологический процесс изготовления мелкозернистой продукции в 2 раза, исключить межфазную транспортировку продукции, осуществлять дистанционное управление технологическим процессом и вывести работающих из опасной зоны.

В связи с сокращением гособоронзаказа, предприятие с 2010 года активно участвует в работе по **утилизации различных номенклатур боеприпасов**. С этой целью на предприятии создан опытно-промышленный участок утилизации стрелковых патронов калибра 7,62.

Работы по модернизации и техническому перевооружению производства продолжают в настоящее время и планируется их завершение к 2020 году. В рамках ФЦП «Развитие оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации на 2011-2020 годы» предусмотрено выполнение работ по созданию модульного производства нитратов целлюлозы и порохов, модернизации и технического перевооружения производства зарядов, модернизации испытательно-лабораторного комплекса, проведения мероприятий по техническому и технологическому обеспечению безопасности функционирования предприятия.

ФКП «КГ КПЗ» как базовое предприятие, принимает участие в выполнении ряда **перспективных ОКР** по темам «Совершенствование – 88», «Обновление», «Грифель-1.2.3», «Свинец 1,2» и др

В 2010 году заслуги предприятия в области внедрения новейших технологий и развития военно-технического сотрудничества были оценены организаторами ежегодной **Национальной премии «Золотая идея»**. Авторский коллектив предприятия был отмечен Первой премией в номинации **«За успехи в области производства продукции военного назначения и внедрение передовых технологий»**.

В 2011 году предприятие по результатам конкурса Минпромторга РФ было признано **лидером по поставкам экспортной продукции с**

**вручением памятного вымпела.**

Для решения кадровых проблем ФКП «КГ КПЗ» и повышения адаптации выпускников к производственным условиям открыт Филиал Инженерного химико-технологического института КНИТУ. В рамках конкурса Минпромторга РФ совместно с ИХТИ КНИТУ проведен эксперимент по созданию функционирующего на условиях самоокупаемости **Центра дополнительного профессионального образования** на производственно-технологической базе федерального казенного предприятия оборонно-промышленного комплекса, В 2011 году получена лицензия на осуществление образовательной деятельности непосредственно ФКП «КГ КПЗ» по ряду программ дополнительного профессионального обучения.

Казанский пороховой завод - старейший в современной России. Основанный по именному указу Императрицы Екатерины II в 1788 г. завод в преддверии своего 225-летия в сегодняшних условиях диверсификации производства не изменяет своему назначению, продолжает совершенствовать производство порохов и метательных зарядов для стрелкового, авиационного, морского оружия и сборку выстрелов к большой номенклатуре артиллерийского, танкового вооружения и к средствам ближнего боя, оставаясь верным своей исторической миссии – **Служению государству Российскому**

## МЕТОД ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ ОБРАЗЦОВ РАКЕТНО-АРТИЛЛЕРИЙСКОГО ВООРУЖЕНИЯ

*С.А. ГРАЙВОРОНСКИЙ*

*Михайловская военная артиллерийская академия  
195009, г. Санкт-Петербург, ул. Комсомола, 22*

При оценке технического уровня образцов ракетно-артиллерийского вооружения (РАВ) часто приходится сравнивать большое число показателей качества. Исходя из этого, возникает необходимость свести большое число показателей качества образцов РАВ в один обобщенный показатель.

При определении обобщенных показателей качества образцов РАВ следует различать два основных случая:

- а) все единичные показатели качества выражены в баллах;
- б) единичные показатели качества выражены в различных единицах (например, часть показателей являются безразмерными величинами, часть показателей выражена в баллах, а часть показателей имеет размерность, причем различную).

Случай а) является простейшим. Здесь при оценке качества эксперты дают оценку различных свойств образцов РАВ в баллах. Такой метод определения показателей качества называется органолептическим.

Обобщенный показатель качества  $W$  может определяться с помощью выражения вида

$$W = \sum_{i=1}^n \alpha_i \tilde{x}_i, \quad (1)$$

где  $\tilde{x}_i$  – среднее значение  $i$ -го единичного показателя качества оцениваемого образца РАВ, полученное экспертным путем;  $\alpha_i$  – коэффициент весомости  $i$ -го единичного показателя качества (определяемый заранее, обычно также – экспертным путем);  $n$  – число рассматриваемых единичных показателей качества.

Уравнение (1) применяется в тех случаях, когда все показатели оцениваются по одной и той же шкале (например – по пятибалльной). В этом случае коэффициенты весомости учитывают относительную важность отдельных показателей.

Часто на практике применяется другой метод, когда для каждого показателя назначается своя шкала баллов. При этом, для маловажных показателей используются, например, баллы от 1 до 5, а для более

важных – от 10 до 15, от 20 до 30 и т.д. В этом случае вместо уравнения (1) используется более простое уравнение

$$W = \sum_{i=1}^n x_i, \quad (2)$$

где  $x_i$  – значение  $i$  – го единичного показателя качества в баллах.

Необходимо подчеркнуть следующее важное обстоятельство. Формулы (1) и (2) имеет смысл применять только в тех случаях, когда все показатели не ниже некоторого допустимого минимума. В противном случае может получиться так, что отдельные неудовлетворительные показатели в этих формулах будут перекрыты за счет других более высоких показателей. Требуется исходить из того, что даже при одном каком-нибудь неудовлетворительном показателе, обобщенный показатель качества образцов РАВ считается неудовлетворительным.

Рассмотрим случай б), в котором возникает проблема приведения всех единичных показателей качества образцов РАВ к одинаковой размерности. Для этой цели часто используют один из двух способов.

Первый способ заключается в приведении всех показателей к баллам. Для этой цели для каждого показателя устанавливается своя шкала баллов. Например, это можно сделать так, как устанавливается шкала в баллах для дальности стрельбы. Для этой цели для каждого показателя качества строится своя таблица баллов. Пример представлен в таблице.

Таблица

**Шкалы баллов за определенный уровень показателя**

Нижний предел показателя	Верхний предел показателя	Балл
$x_1'$	$x_1''$	$b_1$
$x_2'$	$x_2''$	$b_2$
...	...	...
$x_k'$	$x_k''$	$b_k$

Если значение показателя находится в интервале  $(x_1', x_1'')$ , то ему устанавливается балл  $b_1$ , если показатель попадает в интервал  $(x_2', x_2'')$ , то устанавливается балл  $b_2$  и т.д.

При таком способе приведения показателей качества к баллам можно определять обобщенный показатель качества по уравнению (1) или (2). Однако при этом требуется большая осторожность и серьезный

предварительный анализ, основанный на рассмотрении цели, для которой производится оценка качества образцов РАВ, а также на учете особенностей образцов и их единичных показателей качества.

Второй способ – введение безразмерных относительных показателей. По-другому их называют «нормированными». Его сущность заключается в следующем.

Пусть имеются значения единичных показателей качества  $x_i$  ( $i = 1, n$ ), тогда соответствующие им относительные (нормированные) значения получают по выражениям вида

$$\bar{x}_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij} - \min_j x_{ij}}{\max_j x_{ij} - \min_j x_{ij}} \\ 1 - \frac{x_{ij} - \min_j x_{ij}}{\max_j x_{ij} - \min_j x_{ij}} \end{cases} \quad (3)$$

Максимизируемыми называют такие показатели качества, которые при увеличении своих значений приводят к улучшению качества образца РАВ. Минимизируемые показатели, наоборот, при увеличении – приводят к снижению качества образца РАВ.

При таком способе значения показателей  $x_i$  с различными размерностями заменяются нормированными значениями  $\bar{x}_i$  с одинаковой (нулевой) размерностью с абсолютными значениями от 0 до 1.

При этом часто используются три варианта формул для определения обобщенного показателя качества:

– формула средневзвешенного арифметического обобщенного показателя

$$W_{CB}^A = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{\alpha} \bar{x}_i = \frac{\alpha_1}{\alpha} \bar{x}_1 + \dots + \frac{\alpha_n}{\alpha} \bar{x}_n; \quad (4)$$

– формула средневзвешенного геометрического обобщенного показателя

$$W_{CB}^{G.M} = \left[ \prod_{i=1}^n (\bar{x}_i)^{\alpha_i} \right]^{\frac{1}{\alpha}} = \sqrt[\alpha]{\bar{x}_1^{\alpha_1} \cdot \dots \cdot \bar{x}_n^{\alpha_n}}; \quad (5)$$

– формула средневзвешенного гармонического обобщенного показателя

$$W_{CB}^{\Gamma_n} = \frac{\alpha}{\sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{\bar{x}_i}} = \frac{\alpha}{\frac{\alpha_1}{\bar{x}_1} + \frac{\alpha_2}{\bar{x}_2} + \dots + \frac{\alpha_n}{\bar{x}_n}}; \quad (6)$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \alpha_i = \alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n, \quad (7)$$

где  $\bar{x}_i$  – относительное значение  $i$  – го единичного показателя качества;

$\alpha_i$  – коэффициенты весомости отдельных показателей качества.

Заметим, что эти три варианта формул в определенном смысле эквивалентны. Поясним это.

Логарифмируя уравнение (5), получим

$$\lg W_{CB}^{\Gamma_M} = \frac{\alpha_1}{\alpha} \lg \bar{x}_1 + \dots + \frac{\alpha_n}{\alpha} \lg \bar{x}_n. \quad (8)$$

Поскольку величины  $W_{CB}^{\Gamma_M}$  и  $\bar{x}_i$  являются показателями качества образцов РАВ, то их логарифмы также будут показателями качества образцов РАВ.

Вводя обозначения

$$W_{CB}^A = \lg W_{CB}^{\Gamma_M} \text{ и } \bar{x}_i = \lg \bar{x}_i \quad (i = \overline{1, n}),$$

из уравнения (8) получим уравнение (4).

Теперь рассмотрим уравнение (6). Поскольку величины  $\bar{x}_i$  являются показателями качества, то их обратные значения также будут показателями качества. Вводя обозначения

$$W_{CB}^A = \frac{1}{W_{CB}^{\Gamma_n}} \text{ и } \bar{x}_i = \frac{1}{\bar{x}_i} \quad (i = \overline{1, n}),$$

из уравнения (6) получим уравнение (4).

Установив определенную эквивалентность уравнений (4), (5) и (6), заметим, что в литературе эти формулы часто рекомендуются как универсальные, без всякого обоснования и без указания области их применения.

По мнению авторов, этими формулами можно пользоваться только в тех случаях, когда их применение обосновано (для определенной цели оценки качества образцов РАВ и в определенных условиях).

Подчеркнем, однако, важное обстоятельство: формулами (1)...(6) можно (при определенных условиях) пользоваться не только для получения обобщенных показателей качества, но и для определения комплексных групповых показателей качества образцов РАВ.

## **ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ПРИНЯТИЮ РЕШЕНИЯ О ВОЗМОЖНОСТИ И ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ МОДЕРНИЗАЦИИ ОБРАЗЦОВ РАКЕТНО-Артиллерийского вооружения СУХОПУТНЫХ ВОЙСК**

***С.А. ГРАЙВОРОНСКИЙ***

*Михайловская военная артиллерийская академия  
195009, г. Санкт-Петербург, ул. Комсомола, 22*

Многопрофильные рабочие группы (РГ) включают в свой состав специалистов-представителей эксплуатанта, головного разработчика и завода-изготовителя и создаются для решения конкретных задач. Следует отметить, что РГ не являются группами, созданными один раз для разрешения проблем на все время выполнения проекта. На различных этапах разработки образца (ракетно-артиллерийского вооружения) РАВ состав и качественная составляющая групп может существенно меняться. Это зависит от характера и времени возникновения проблемы, требующей разрешения.

В процессе разработки перспективного образца РАВ от разработчика требуются не только его знания как инженера-конструктора, но и знания технолога, эксплуатанта и ремонтника. Разработчик может согласно полученного тактико-технического задания (ТТЗ) грамотно создать рабочую конструкторскую документацию, но из-за недостаточных знаний к примеру технолога, производство даже опытного образца может быть невозможно, например из-за отсутствия необходимого технологического оборудования. Или же из-за недостаточных знаний эксплуатанта тот же опытный образец не проходит испытания, например по требованиям положений Боевого устава, и таких вопросов в процессе разработки может накопиться немало.

Поэтому, целью создания РГ является минимизирование риска принятия решения при обосновании конфигурации проектируемого образца РАВ.

Разработчик формирует первый вариант электронной модели изделия (ЭМИ), а дальше к работе подключаются технолог, эксплуатант и ремонтник, анализируя первый вариант изделия со своих позиций. Такой способ проектирования является эффективным методом повышения производственной, эксплуатационной и ремонтной технологичности, контролепригодности изделий, при одновременном сокращении сроков проектирования. Еще до того, как первая деталь будет изготовлена на станке, изделие будет всесторонне исследовано на приспособленность к

эксплуатации и восстановлению, все выявленные недостатки будут устранены.

Формирование РГ возможно согласно набора требований, предъявляемых к каждому члену группы, вариант которых в общем виде представлен в таблице 1.

Технологии управления качеством определяют общие требования к организации процесса проектирования, направленные на обеспечение его управляемости.

Технологии управления конфигурацией направлены на достижение заданных функциональных и технических характеристик проектируемого изделия.

В ходе эскизного проекта должна быть решена задача идентификации объектов конфигурации. На основе выявленных объектов конфигурации формируется, контролируется, вводится в базу данных проекта и утверждается функциональная базовая конфигурация (ФБК). На последующих стадиях проекта ФБК используется в качестве основы для контроля выполнения заданных требований путем сравнения полученных проектных характеристик с ФБК.

Таблица 1

**Вариант набора требований, предъявляемых к членам формируемой многопрофильной рабочей группы**

Наименование требований	
Общие требования	Специальные требования
1. Иметь высшее инженерное образование	1. Знать положения концепций ИПИ-технологий
2. Иметь практические навыки работы с компьютером	2. Знать принципы работы системы управления инженерными данными и жизненным циклом изделия
3. Быть профессионалом в своей сфере деятельности	3. Знание положений стандартов серий ISO (представлены в таблице 2)
	4. Иметь навыки работы с электронной моделью изделия
	5. Иметь полномочия на внесение изменений в проект

В ходе разработки одновременно должен использоваться комплекс управленческих технологий: управления качеством, конфигурацией, проектами, данными об изделии, интегрированной логистической поддержки. Задачи проекта, приведены в таблице 2.

Схема работы МПГ по управлению конфигурацией разрабатываемого комплекса ракетного вооружения представлена на рис. 1.

Технологии управления проектами используются при разработке планов и графиков работ, графиков потребностей в ресурсах, а также для учета их выполнения. Разрабатываются модели потоков работ (Work Flow) для процессов разработки, согласования и утверждения проектных решений. План работ формируется на основе последовательно уточняемой конструкторской и производственно-технологической структуры изделия, поддерживаемой в системе PDM.

По мере проработки и формирования конструктивных решений в базе данных PDM устанавливаются связи между объектами конфигурации и конкретными конструкторскими документами (данными). Решается задача контроля конфигурации, т. е. проводится контроль и анализ соответствия полученных проектных характеристик заданным функциональным и техническим требованиям. Проверка статуса конфигурации призвана обнаружить наличие всех утверждений.

При сдаче эскизного и технического проектов заказчику предъявляются доказательства соответствия полученных и заданных характеристик.

В соответствии с требованиями стандартов интегрированной логистической поддержки (ИЛП) формируется перечень элементов изделия и средств его эксплуатации, являющихся кандидатами на проведение анализа логистической поддержки (АЛП), направленного на определение оптимального уровня надежности, ремонтпригодности, стоимости и т.д.

Из этих элементов строится дерево логистической структуры изделия и средств обеспечения эксплуатации, данные также заносятся в базу данных проекта.

На стадиях эскизного и технического проектов осуществляется АЛП, результатами которого являются расчетные параметры надежности, ремонтпригодности, требования к персоналу и т. д. Эти данные вводятся в базу данных проекта и связываются с логистической структурой изделия. Разрабатывается план технического обслуживания и ремонта (ТОиР). На базе логистической структуры изделия разрабатываются планы-перспективы эксплуатационной документации.

В ходе выполнения рабочего проекта разрабатывается проектная базовая конфигурация (ПБК). В процессе аудита конфигурации ПБК сравнивается с ФБК. При выявлении несовпадений проводится анализ и выявление объектов конфигурации, являющихся причинами отклонений. Затем выполняется необходимая доработка проекта и его повторное утверждение.

Таким образом, создание РГ, включающих, в зависимости от решаемых задач, специалистов различного рода с опытом работы с ЭМИ и управленческими технологиями, позволит создать разрабатываемый

образец в более короткие сроки и с меньшим количеством ошибок. Кроме того, в связи с переходом с бумажного документооборота на электронный ожидается сокращение затрат на разработку КТД.

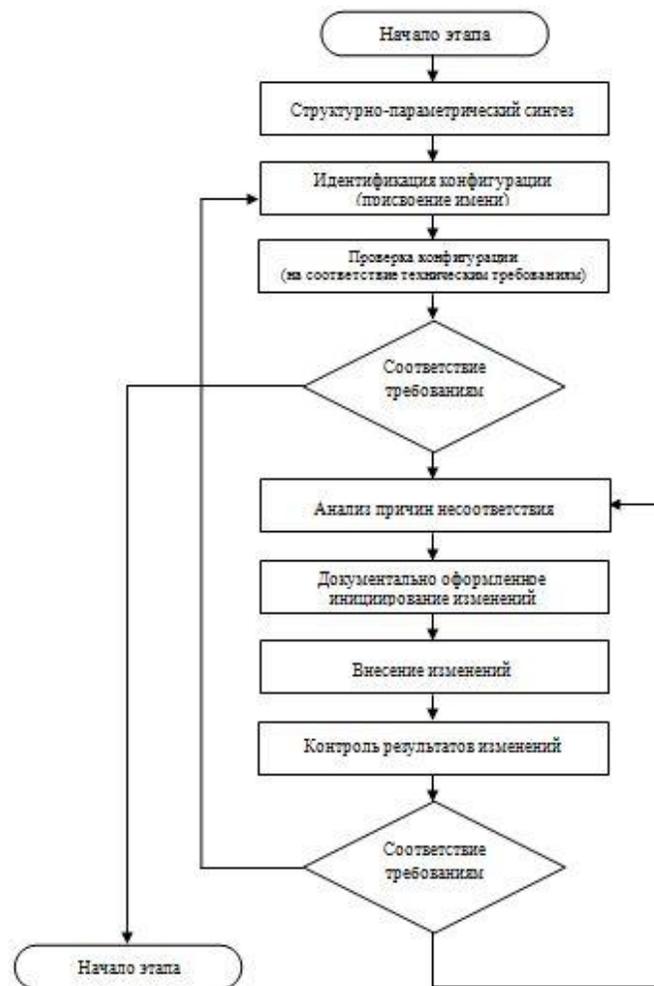


Рис. 1 – Схема работы многопрофильной рабочей группы по управлению конфигурацией и техническим уровнем разрабатываемого образца ракетно-артиллерийского вооружения

Таблица 2 - Применение управленческих технологий в процессах проектирования изделий						
Основные решаемые задачи на стадиях разработки проекта изделия	Управление качеством (ISO 9001)	Управление конфигурацией (ISO 10007)	Управление проектами (ISO 10006)	Интегрированная логистическая поддержка (DEF STAN 0060)	Управление данными об изделии (ISO 10303)	
<b>Начальная стадия проекта:</b> 1. Разработка технического задания 2. Оценка стоимости проекта 3. Согласование графика поставки и документации заказчику	1. Разработка (проверка) наличия документированных процедур норм-контроля, метрологического контроля, технологического контроля, обеспечения технологичности 2. Проверка наличия (выполнения) процедур периодической оценки проекта	1. Разработка плана управления конфигурацией 2. Разработка функциональной базовой конфигурации	1. Разработка укрупненного плана-графика работ. 2. Разработка укрупненного плана потребностей в ресурсах для выполнения проекта	1. Разработка логистической структуры изделия 2. Выбор изделия-аналогата для проведения анализа логистической поддержки. Разработка плана АЛП	1. Настройка базы данных PDM, создание словарей и справочников 2. Создание конструкторской и производственно-технологической структур изделия 3. Создание зональной структуры изделия	
<b>Основные стадии проекта</b> (эскизный, технический проекты). 1. Разбивка изделия на зоны 2. Формирование конструкторской структуры изделия и определение весовых лимитов для элементов изделия 3. Формирование производственно-технологической структуры изделия систем 4. Детальное проектирование конструкции изделия 5. Увязка элементов конструкторской документации 6. Выпуск конструкторской документации 7. Разработка свободной спецификации и графика приобретения материалов и покупных изделий 8. Расчетное определение характеристик изделия, заданных в ПЗ	3. Проверка наличия (выполнения) планов для каждой из работ. 4. Проверка документирования входных данных проекта 5. Проверка наличия (выполнения) документированных процедур, проведения изменений 6. Проверка наличия документированных требований к выходным проектным данным (разработка НТД)	3. Разработка проектной базовой кон-фигурации 4. Контроль конфигурации 5. Аудит конфигурации	3. Разработка и увязка детализированных планов проектирования 4. Разработка детализированного плана потребностей в ресурсах 5. Учет выполнения планов и их корректировка. 6. Наполнение статистики по этапам и видам работ. 7. Формирование отчетов	3. Проведение АЛП. 4. Формирование БД АЛП 5. Разработка плана ПОиР 6. Разработка плана МТО 7. Разработка общей базы данных эксплуатационной документации	4. Ведение БД функциональных базовых конфигураций 5. Ведение БД АЛП 6. Ведение БД конструкторских данных и результатов проекта 7. Ведение БД системы менеджмента качества 8. Управление потоками работ (Work Flow)	

**МЕТОД ОЦЕНКИ МОДЕРНИЗАЦИОННОГО  
ПОТЕНЦИАЛА ОБРАЗЦОВ РАКЕТНО-  
АРТИЛЛЕРИЙСКОГО ВООРУЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ  
ПРОГНОЗНОЙ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ  
ИЗМЕНЕНИЯ ИХ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ В  
ПРОЦЕССЕ ЭВОЛЮЦИОННОГО РАЗВИТИЯ**

***С.А. ГРАЙВОРОНСКИЙ***

*Михайловская военная артиллерийская академия  
195009, г. Санкт-Петербург, ул. Комсомола, 22*

Под эволюционным развитием образцов РАВ понимается [1] процесс медленного, постепенного развития (изменения) его качественных и количественных характеристик, связанный соответственно с постепенным повышением ТУ образца РАВ.

Данному процессу характерны следующие этапы:

стабилизация, являющееся следствием наиболее полного изучения и эффективного использования законов и принципов работы элементов и их изготовления;

возрастание скорости развития, являющееся следствием освоения законов и принципов работы элементов и подсистем ТС и их изготовления, а также являющееся следствием научно-технического прогресса;

затухание, являющееся следствием морального устаревания ТС и проявления старой элементной базы.

Как правило, почти каждый существующий образец РАВ тем или иным образом подвергался модернизации. Поэтому логично в установившуюся последовательность этапов эксплуатации ввести этап модернизации системы. Тогда схематический механизм развития образца РАВ может быть представлен в виде рис. 1.

По сравнению с традиционной последовательностью этапов эксплуатации образца РАВ здесь делается акцент на выделение неоднократных модернизаций системы (этап модернизации). Чем больше количество модернизаций, тем продолжительней стадия эксплуатации, а, следовательно, увеличивается и продолжительность всего ЖЦ. С учётом сложившегося экономического положения в государстве данное обстоятельство становится весьма важным, т.к. в этом случае предусматривается значительная экономия затрат при поддержании существующих систем на необходимом уровне развития.

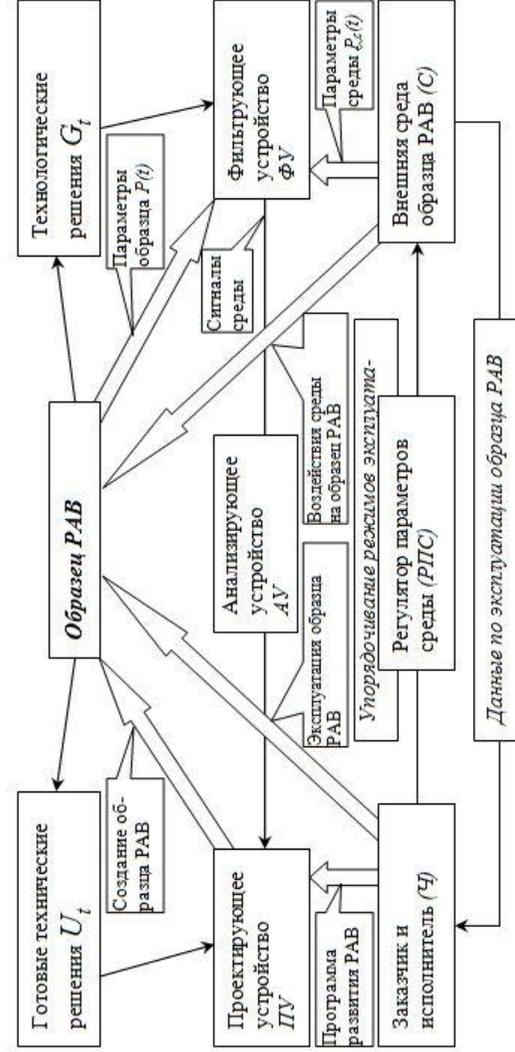


Рис. 1. Схематический механизм развития образца RAB

Исходя из вышеизложенного, понятию «модернизация» можно дать следующее определение.

Модернизация – этап эксплуатации ТС, на котором производится изменение серийных изделий системы, направленное на расширение их возможностей по целевому применению, снижение затрат на эксплуатацию или повышение технико-экономических показателей при изготовлении изделий. На ранних этапах разработки необходимо закладывать в конструкцию образца определенный МП. Однако совершенно очевидным является то, что МП необходимо уметь и оценивать.

Для оценки МП необходимо иметь определенную совокупность значений ТУ после проведения работ по модернизации рассматриваемого образца РАВ, которые однозначно характеризуют эволюционное развитие данного образца.

Пусть проведено  $s$  – модернизаций рассматриваемого образца РАВ. Тогда эволюционный ряд можно охарактеризовать значениями ТУ после каждой модернизации  $W_j = \{W_1, W_j, \dots, W_s\}$ ,  $j = \overline{1, s}$ , где  $W_j$  – значение ТУ образца вооружения после проведения работ по  $j$  – й модернизации. Значения ТУ рассчитываются в соответствии с методом оценки ТУ [2]. Кроме того, имеется значение технического уровня гипотетического базового образца  $W_{\bar{\sigma}a3}$ , которое можно рассматривать как максимально достигнутое значение ТУ на момент оценки рассматриваемого образца РАВ. В данном случае  $W_{\bar{\sigma}a3}$  характеризуется лучшими значениями ПК.

Таким образом, совершенно очевидно, что для времени  $t_s$  можно определить разность

$$\Delta W_s = W_{\bar{\sigma}a3} - W_s, \quad (1)$$

которая не является ничем иным, как величиной модернизационного потенциала оцениваемого образца вооружения в момент времени  $t_s$ .

Изменение единичных показателей эволюционного развития образца вооружения логично описывать посредством дифференциальных уравнений следующего вида

$$\frac{dx}{dt} = f(x, y_+, y_-).$$

Здесь  $y_+$  обозначает влияние, стимулирующее развитие, а  $y_-$  влияние, тормозящее его. Это обстоятельство выражается следующими требованиями

$$y_+^*(t) \geq y_+(t) \text{ влечет } f(x, y_+^*, y_-) \geq f(x, y_+, y_-);$$

$$y_-^*(t) \geq y_-(t) \text{ влечет } f(x, y_+, y_-^*) \leq f(x, y_+, y_-).$$

К автономному поведению системы можно прийти, если  $y_+$  и  $y_-$  жестко задать заранее. Описывается оно, как известно, дифференциальными уравнениями вида

$$\frac{dx}{dt} = f(x) \text{ или } \frac{dx}{dt} = f(x_+, x_-).$$

Неравенство  $f \geq 0$  является необходимым и достаточным условием для развивающейся системы.

Допустим, что при исследовании роста конкретной характеристики образца РАВ пришли к выводу – скорость её роста  $dx/dt$  пропорциональна достигнутому уровню характеристики  $x$ . Значение данной характеристики будет определяться обликом конкретной подсистемы образца РАВ.

Тогда закон, определяющий достигнутое значение характеристики в зависимости от времени, находится из дифференциального уравнения

$$\frac{dx}{dt} = rx \quad (x > 0), \quad (2)$$

где  $r$  - константа, характеризующая (в среднем) отклики потребителя на изменения облика блока (устройства), из которых формируется образец вооружения.

Величина  $r = \frac{1}{x} \cdot \frac{dx}{dt}$  в данном контексте рассматривается в качестве относительной скорости роста  $X$ .

Решение дифференциального уравнения (2) имеет вид

$$x = a \cdot e^{r \cdot t},$$

где  $a$  – постоянная, характеризующая некоторый начальный уровень характеристики  $x$ .

При таком подходе не трудно найти время, необходимое для удвоения характеристики  $x$ .

Пусть  $x_0 = a$  при  $t = 0$ , а уровень  $x = 2x_0$  достигается при  $t = T$ .

$$\text{Тогда } 2x_0 = a \cdot e^{rT}, \quad 2 = e^{rT}, \quad \ln 2 = rT, \quad T = \ln 2 / r.$$

В данном случае время, необходимое для удвоения характеристики  $x$ , зависит от её относительной скорости роста.

При резком изменении внешних условий более приемлем закон

$$\frac{dx}{dt} = f(x_+, x_-),$$

где кроме стимулирующих факторов имеются и сдерживающие факторы. В этом случае рост характеристики  $x$  ограничивается некоторым уровнем  $b$ , тогда выражение (2) примет вид

$$\frac{dx}{dt} = r \cdot x \cdot (b - x) \quad (r > 0, \quad 0 < x < b). \quad (3)$$

Физически данное выражение показывает, что относительная скорость роста  $x$  становится уже не постоянной, а линейной функцией от  $x$ , т.е. чем ближе значение показателя  $x$  к максимальному значению  $b$ , тем большие затраты последуют при необходимости его увеличения

$$\frac{1}{x} \cdot \frac{dx}{dt} = r \cdot (b - x).$$

Решение уравнения (3) имеет вид

$$\frac{dx}{x(b-x)} = r dt,$$

$$\int \frac{dx}{x(b-x)} = rt + C, \quad \left( \text{при } C = -\frac{1}{b} \ln a \right),$$

$$\frac{1}{b} \ln \frac{x}{b-x} + \frac{1}{b} \ln a = rt, \quad \frac{ax}{b-x} = e^{brt},$$

$$ax = (b-x)e^{brt}, \quad x \cdot (a + e^{brt}) = be^{brt},$$

$$x = \frac{be^{brt}}{a + e^{brt}}, \quad x = \frac{b}{1 + ae^{-brt}}. \quad (4)$$

Выражение (4) представляет собой логистическую кривую.

В начальные моменты времени, когда  $x$  значительно меньше  $b$ , кривая практически совпадает с экспонентой  $x = be^{brt}$ . Прямые  $x = b$  и  $x = 0$  служат асимптотами логистической кривой. Точка  $D$  с

координатами  $\left( \frac{\ln a}{br}; \frac{b}{2} \right)$  является точкой перегиба.

Анализируя выражения (3) и (4), можно сделать вывод, что при  $x_{ij}^{\max}, x_{ij}^{\min}$  - детерминированных конкретных значениях, выражение для эволюции относительного приведенного единичного показателя может быть записано как

$$x_j = \frac{e^{rjt}}{a_j + e^{rjt}}. \quad (5)$$

Таким образом, имея эволюционный ряд значений ТУ образца вооружения целесообразно использовать метод экстраполяции.

Под экстраполяцией [3] в самом общем смысле понимается процедура перенесения выводов, полученных на участке наблюдения, на явления, находящиеся вне этого участка. Следовательно, на основании известных значений  $W_j = \{W_1, W_j, \dots, W_s\}$ ,  $j = \overline{1, s}$ , лежащих внутри интервала времени модернизации  $t_j = \{t_1, t_j, \dots, t_s\}$ ,  $j = \overline{1, s}$  необходимо получить значения  $W_{s+1}, \dots, W_{s+l}$  в точках, лежащих вне интервала  $t_j = \{t_1, t_j, \dots, t_s\}$ . Наиболее рациональным путем решения является использование метода наименьших квадратов и определение уравнения регрессии на основе зависимости (4). Данная процедура весьма трудоемка, однако использование функций математического процессора MatCad позволяет решить эту проблему с высокой степенью достоверности.

Таким образом метод оценки ТУ образцов РАВ и прогнозная регрессионная модель изменения ТУ в процессе эволюционного развития позволяют рассчитать и спрогнозировать следующие данные:

значения ТУ  $W_j = \{W_1, W_j, \dots, W_s\}$ ,  $j = \overline{1, s}$ , лежащих внутри интервала времени модернизации  $t_j = \{t_1, t_j, \dots, t_s\}$ ,  $j = \overline{1, s}$  и прогнозные значения  $W_{s+1}, \dots, W_{s+l}$ ;

значения ТУ базового образца  $W_j^{\text{баз}} = \{W_1^{\text{баз}}, W_j^{\text{баз}}, \dots, W_s^{\text{баз}}\}$ ,  $j = \overline{1, s}$ , лежащих внутри интервала времени модернизации  $t_j = \{t_1, t_j, \dots, t_s\}$ ,  $j = \overline{1, s}$  и прогнозные значения  $W_{s+1}^{\text{баз}}, \dots, W_{s+l}^{\text{баз}}$ .

Далее, полученные данные целесообразно представить в виде графиков зависимостей ТУ от времени (рис. 2). Из рисунка видно, что

величиной модернизационного потенциала будет служить разность между значениями ТУ базового образца и оцениваемого.

Таким образом

$$МП_j = W_j^{\text{баз}} - W_j, \quad (6)$$

откуда следует, что если

$МП_1 < МП_j < МП_s < МП_{s+1}$  - образец идет по прогрессивному пути развития;

$МП_1 > МП_j > МП_s > МП_{s+1}$  - образец идет по регрессивному пути развития;

$МП_1 = МП_j = МП_s = МП_{s+1}$  - образец развивается в соответствии с научно-техническим прогрессом.

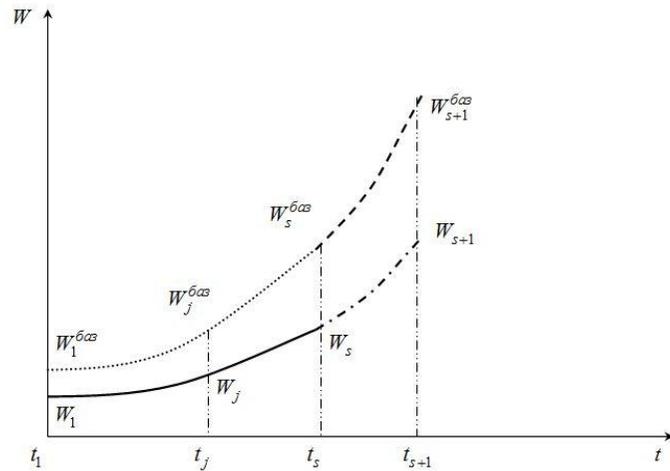


Рис. 2. Графическое изображение значений  $W_j$  и  $W_j^{\text{баз}}$

Таким образом, исходными данными для метода являются полученные значения ТУ рассматриваемых образцов РАВ в соответствии с этапами их модернизации с помощью метода оценки ТУ образцов РАВ [2]. Далее осуществляется получение уравнения регрессии изменения ТУ образцов РАВ с использованием прогнозной регрессионной модели изменения ТУ в процессе эволюционного развития и прогнозирования значений ТУ на ближайшую перспективу. Таким образом, разработанный метод позволил получить значения ТУ базового образца РАВ (характеризуемого лучшими значениями показателей качества) и рассматриваемого образца РАВ, спрогнозировать значения ТУ и

рассчитать значения МП рассматриваемого образца РАВ.

Совокупность метода оценки технического уровня и метода оценки модернизационного потенциала образцов РАВ на основе прогнозной регрессионной модели изменения его технического уровня в процессе эволюционного развития доведены до программной реализации, на основании чего получено свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ [4].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Флюстин А.Е., Гасюк Д.П., Бочков А.П.* Модернизация технических систем. – СПб.: Союз, 2002. - 258 с.
2. *Грайворонский С.А., Россошанский П.В.* Оценка технического уровня образцов ракетно-артиллерийского вооружения. Тематический сборник № 36 «Боевое применение Ракетных войск и артиллерии в операции (бою)».- СПб.: МВАА, 2011 .- С.171-174.
3. *Голик Е.С.* Теория и методы прогнозирования: Учебное пособие. – СПб.: СЗТУ, 2002. – 105 с.
4. *Грайворонский С.А., Поздеев С.В., Россошанский П.В., Филатов И.Н. и др., всего 12 чел.* Прогнозная оценка модернизационного потенциала сложной технической системы. Программа для ЭВМ. М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Свидетельство № 2012612370 об официальной регистрации программы для ЭВМ. 2012 г.

## НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА РАБОТОСПОСОБНОСТИ СТВОЛОВ АРТИЛЛЕРИЙСКИХ ОРУДИЙ

**В.В. ЕГОРОВ**

*Балтийский государственный технический университет  
198005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул. д. 1,  
т. (812) 495-77-48, факс (812) 575-06-11, E-mail knight-vladimir@ya.ru*

Ствол и прежде всего, ствольная труба как командная деталь артустановки, во многом определяют её эксплуатационные характеристики.

При проектировании ствола перед конструктором встаёт широкий круг сложных задач, которые ему необходимо решить при ограниченном времени и большой ответственности, так как ошибка при проектировании и экспертизе ствола артиллерийского орудия (АО) может привести к значительным финансовым и временным потерям. Минимизировать вероятность нерациональных, ошибочных конструкторских решений можно при наличии так называемой проектно-экспертной системы (ПЭС) [1], т.е. системы, аккумулирующей в формальном виде знания специалистов в области проектирования и экспертизы стволов АО.

Создание такой ПЭС — т.е. эффективного программного продукта предназначенного для генерации проектных решений одновременно с их экспертизой на осуществимость и надёжность функционирования — сложная задача, шагом к решению которой является автоматизация проектной экспертизы ствола АО на ранних стадиях проектирования. Такая автоматизация может быть достигнута за счёт соответствующего программного обеспечения — рабочего аналога проектно-экспертной системы ствола. Однако при создании подобного продукта необходимо соблюсти баланс между функциональностью и затратами на разработку и поддержку, поэтому было бы избыточно разрабатывать ПЭС способную решать весь спектр задач, стоящих перед конструктором — целесообразно остановиться только на типовых задачах проектирования и экспертизы ствола (рис. 1). Перечень задач, которые можно считать типовыми, может изменяться от проекта к проекту и отражает особенности принципиальной схемы орудия.

Классификационным признаком для выбранного деления типовых задач является вариативность параметров формальной информационной модели ствола.

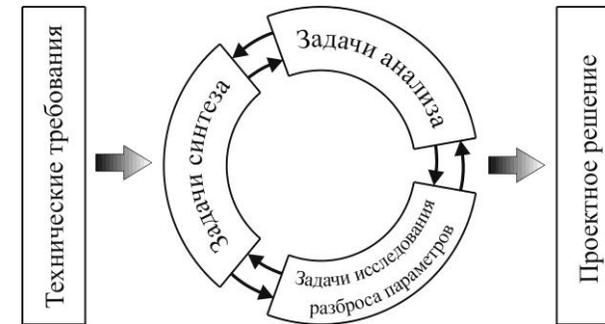


Рис. 1. Типовые задачи проектирования и экспертизы

Под *формальной информационной моделью* будем понимать модель объекта, представленную в виде информации на формальном (профессиональном) языке, описывающую существенные для данного рассмотрения параметры объекта.

В *задачах синтеза* существуют условия, которым должны удовлетворять характеристики «неизвестной модели», и требуется построить модель этого объекта. Решение задачи синтеза представляет собой итерационный процесс из следующих шагов:

1. создание «исследовательской модели»;
2. анализ модели (решение задачи анализа);
3. сравнение результатов анализа с условиями задачи.

Типовые задачи синтеза ствола АО получим, накладывая ограничения на параметры ствола. Так возможно наложение ограничений по материалу, массе, наружным размерам и т. д. Комбинация таких ограничений и даёт в итоге конкретную проектную задачу, которая может характеризоваться либо неполнотой входной информации (много удовлетворительных вариантов решения), либо избыточностью входной информации (нет удовлетворительных вариантов решения).

Обе ситуации типичны для проектирования стволов, и, как правило, проявляются и разрешаются по-разному. В первой ситуации привлекаются дополнительные соображения, отсутствующие как требования технического задания (ТЗ). В процессе проектирования данные соображения вытекают обычно из опыта, знаний, иногда интуиции пользователя, но могут исходить и из промежуточных результатов автоматизированного проектирования или из сведений, входящих в информационно-справочную систему. Вторая ситуация разрешается после доказательства несовместимости поставленных в ТЗ требований путем отступления от каких-либо из них частично или целиком. Выбор пути отступления, расширения или снятия ограничений ТЗ трудно формализуем, к тому же выходит за область компетентности

ПЭС, поэтому при автоматизации проектной задачи по стволу необходимо поставить в ее центр специалиста-проектировщика, активно взаимодействующего с ПЭС.

Однако ПЭС может предлагать специалисту-проектировщику типовые варианты проектных решений (так называемые «исследовательские модели») на основе имеющихся эмпирических методов и статистических данных, которые могут быть им приняты, отвергнуты, или скорректированы, т. е. процесс проектирования должен проходить в диалоговом режиме.

В *задачах анализа* существует модель объекта и требуется в результате работы с этой моделью определить её неизвестные характеристики. При решении задач анализа проверяют условия работоспособности [2], т. е. требования, которым должна удовлетворять конструкция ствола, полученные при рассмотрении ствола как элемента различного рода систем и подсистем ствольного комплекса.

Работоспособность ствольных комплексов определяются при рассмотрении внешних моделей функционирования [3], т. е. моделей решения боевых задач. Работа же ствола описывается, как правило, внутренними моделями напряженно-деформированного состояния, нагрева, износа и т. д. Связи между внешними и внутренними моделями функционирования сложны и носят опытно-эмпирический характер. Поэтому целесообразно изучать вопрос о работоспособности стволов, оставаясь в рамках внутренних моделей, определяя отказ ствола через параметры, непосредственно относящиеся к нему.

Анализ сложившихся физических представлений о процессах, протекающих в артстволе, позволяет выделить по внутренним задачам функционирования несколько групп:

- а) параметры, характеризующие прочность ствола и его частей;
- б) параметры, характеризующие изменение поверхности канала ствола;
- в) параметры ствола как механической колебательной системы;
- г) параметры, характеризующие ствол как составную часть орудия;
- д) тепловой аспект;
- е) технологический аспект.

Для каждой из таких групп систему условий работоспособности можно записать в виде неравенств типа

$$A \lesseqgtr [A], \quad (1)$$

где  $A$  — матрица-строка (вектор) параметров ствола,  $[A]$  — вектор допустимых значений этих параметров.

Такая форма записи условий работоспособности позволяет дать экспертную оценку каждого проектного решения в формализованном виде, но требует установления допустимых значений параметров, которые должны быть получены из анализа как внутренних, так и внешних моделей функционирования.

Матрицу-строку каждой группы следует понимать как открытую — развитие представлений о работоспособности ствола расширяет и видоизменяет ее. Сведённые воедино, неравенства всех групп составляют систему условий работоспособности артиллерийского ствола.

Неравенства вида (1) формализуемы для использования в ПЭС, однако трудность заключается в подборе соответствующих моделей функционирования, которые как не могут быть слишком сложны, так и должны иметь достаточную точность решения.

*Задачи исследования разброса параметров* предполагают, что часть параметров модели известна, а другая изменяется в некотором (обычно небольшом) интервале, и необходимо определить влияние этих изменений. Задачи подобного рода могут возникать при назначении допусков на элементы ствола, а также в случаи оценки надёжности ствола артустановки. Трудность в решении задач исследования разброса параметров заключается в правильном учёте их взаимного влияния. Как правило, в задачах исследования разброса параметров изменение характеристик определяется посредством многократного решения задач анализа, что подчёркивает важность выбора правильных моделей функционирования ствола.

Рассмотрение типовых задач проектной экспертизы позволило составить перечень необходимых модулей, вошедших в первую версию ПЭС, а также сформулировать требования предъявляемые к ним. Классификация типовых задач выявила три типа необходимых модулей: 1) проектные, решающие задачи синтеза; 2) экспертные, решающие задачи анализа; 3) и модули, исследующие разброс параметров.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Гуцин А. Н., Радченко И. А.* Экспертные системы: учебное пособие. Балт. гос. техн. ун-т. – СПб. 2007. 92 с.
2. *Зайцев А. С.* Проектирование артиллерийских стволов. Балт. гос. техн. ун-т. – СПб. 2007. 164 с.
3. *Чуев Ю. В.* Проектирование ствольных комплексов. М.: Машиностроение, 1976. 216 с.

## ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КЛАСТЕРА Fujitsu ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ АЭРОДИНАМИКИ

**В.В. ЕЛЕСИН<sup>1</sup>, А.В. ЗИБАРОВ<sup>1</sup>, Ф.А. МАКСИМОВ<sup>2</sup>, В.В. ТИТОВ<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>GDT Software Group, г.Тула

т.(4872) 20-68-77, факс (4872) 20-53-44, E-mail: [info@cfд.ru](mailto:info@cfд.ru)

<sup>2</sup>Институт автоматизации проектирования РАН, г.Москва

т.(499) 250-92-80, факс (499) 250-89-28, E-mail: [maximov@cfд.ru](mailto:maximov@cfд.ru)

Расширение возможностей вычислительной аэродинамики связано с использованием многопроцессорной вычислительной техники (МВТ). Эта техника становится доступной не только в МСЦ РАН (МВС-100К), но и для небольших коллективов в виде малогабаритных кластеров с числом вычислительных ядер порядка 100 (например, универсальные компактные ЭВМ АПК-1М и АПК-3 РФЯЦ-ВНИИЭФ). В докладе приведены результаты тестирования кластера Fujitsu. Целью тестирования являлась оценка возможности установки имеющегося у авторов программного продукта и производительности вычислений. Также хотелось оценить уровень задач, которые становятся возможным решать, и условия, в которых возможна эксплуатация этой техники.

### **Технические характеристики сравниваемых образцов.**

Персональная ЭВМ: AMD Phenom II x6 1100T Black 3.31 ГГц, 16 Гб DDR3 1333 МГц PC3-10600.

Персональный кластер Fujitsu PRIMERGY BX400 S1: вычислительных узлов: 8 (BX920 S2: 2 x Intel Xeon X5675 6C/12T 3.06 ГГц, 48 Гб RAM DDR3 1333 МГц PC3-10600).

Суперкомпьютер МВС-100К: вычислительных узлов: 990 (2 x Intel Xeon E5450 3 ГГц, 8 Гб RAM), сеть: Infiniband 4x DDR

**Установка вычислительных программ.** Использование собственных программ (FORTRAN, C++) и их трансляция с помощью установленных компиляторов не вызвала каких-либо проблем. Для организации параллельных вычислений используют MPI.

**Оценка производительности.** Производительность МВТ зависит от многих факторов. Существуют тесты для сравнения, однако здесь тестирование делалось на основе разработанных авторами программ.

**Тест 1.** Расчет конического течения. Данная задача двумерная, при её решении, в отличие от трехмерных, можно использовать сетки с достаточно большим диапазоном изменения количества узлов. Это позволяет оценить влияние размера расчетной сетки (а, соответственно, требуемого объема памяти) на производительность. Задача решается методом установления с использованием явной схемы [1]. Для оценки

производительности измеряется время, требуемое на фиксированное количество шагов. В данном тесте на каждое ядро загружалась задача со своими параметрами, обмена информацией между ядрами не осуществлялось. На рис.1 приведена величина  $\Delta = \frac{T}{N}$ , где T - время в секундах, затрачиваемое на 1000 шагов в зависимости от количества N узлов расчетной сетки.  $\Delta$  - время, затрачиваемое на один узел за 1000 шагов по времени. В каждом узле проводятся одинаковые вычисления независимо от размерности сетки. Однако  $\Delta$  не есть константа от N. С увеличением N величина  $\Delta$  существенно увеличивается.

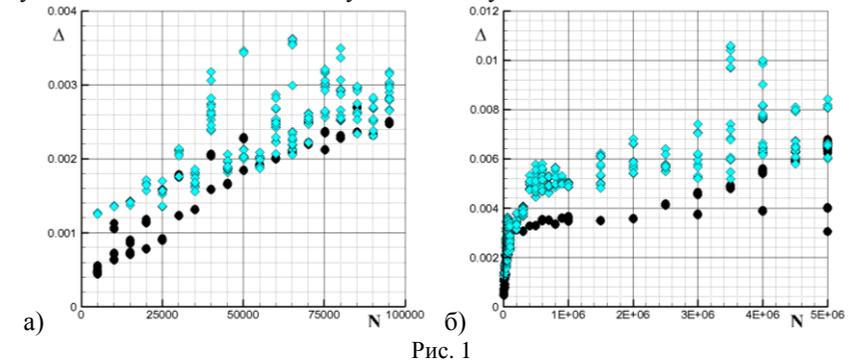


Рис. 1

На рис.1 черными маркерами в виде кружка отмечены времена, полученные при тестировании программы на MVS-100K РАН, а светлыми маркерами, полученные на тестируемом кластере Fujitsu. Рис.1а и 1б отличаются масштабами, что позволяет посмотреть детали для разных значений N. Видно, что производительность вычислительных ядер этих двух машин при малом общем числе узлов (до 100 тысяч) отличается несущественно. И хотя для кластера Fujitsu почти во всех случаях время больше, отличие составляет не более 20%. При увеличении N ( $N > 200 \cdot 10^3$ , рис.1б) отличие между процессорами начинает систематически увеличиваться и при  $N = 700 \cdot 10^3$  кластер Fujitsu считает приблизительно в 1.5 раза медленнее. Скорость вычислений при решении двумерной задачи на одном ядре кластера Fujitsu не более чем в 2 раза медленнее во всем рассмотренном диапазоне N (до  $5 \cdot 10^6$ ). Для кластера Fujitsu характерен достаточно большой разброс между процессорами, решающими одинаковую задачу, что при решении одной задачи несколькими процессорами плохо, так как общая скорость решения будет определяться самым медленным процессором.

**Тест 2.** В качестве второго теста проведено сравнение времен решения трехмерной задачи при использовании двух МВТ. Рассматривается трехмерное вязкое течение на основе уравнений Навье-

Стокса. Количество узлов расчетной сетки  $365 \times 57 \times 57 = 1185885$ . Декомпозиция расчетной области делалась по трем направлениям. В табл.1 представлено время  $T$  (в минутах) на 10000 шагов в зависимости от числа используемых процессоров. По результатам этого теста, кластер Fujitsu имеет меньшую производительность в 3-4 раза, чем МВС-100К.

N	Fujitsu	МВС-100К
24=6×2×2	59.5	-
48=12×2×2	29.8	-
72=9×2×4	15.2	5.12
96=24×2×2	10.9	-
96=6×4×4	14.4	-
144=9×4×4		2.07

Таблица 1

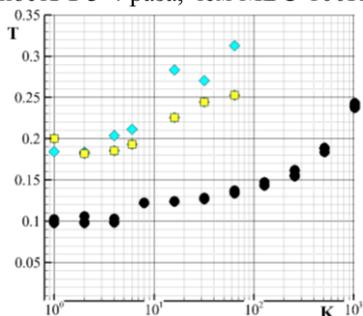


Рис. 2

**Тест 3.** В третьем тесте была установлена программа для расчета трехмерного течения около ракетной конфигурации на типовой сетке  $65 \times 51 \times 645 = 2138175$ . Расчет 10000 шагов по времени на МВС-100К на 106 ядрах составляет 5.7 минут. На кластере Fujitsu этот же расчет делался с привлечением 53 ядер и составлял около 26 минут. С учетом того, что использовалось в 2 раза меньше ядер, расчет на кластере Fujitsu делается приблизительно в 2.3 медленнее.

**Тест 4.** В данном тесте оценивается рост затрат на шаг интегрирования из-за увеличения количества используемых ядер. Рассматривается линейная декомпозиция расчетной области. Используется  $K$  ядер, каждое из которых решает одну задачу и обменивается информацией только с двумя соседними ядрами для соединения решения. Теоретически время на шаг интегрирования не должно зависеть от числа используемых ядер. На рис.2 приведено экспериментально замеренное время в минутах на 1000 шагов интегрирования в зависимости от числа  $K$  задействованных ядер. Каждое ядро решает двумерную задачу на сетке  $35 \times 201$ . Темные маркеры соответствуют МВС-100К, светлые – Fujitsu (приведены две серии расчетов). Увеличение используемых ядер  $K$  приводит к линейному росту затрат времени, которое при использовании значительного количества ядер возрастает более чем в 2 раза. Характерно, что вид зависимости одинаков для обоих кластеров.

**Тест 5.** Данный тест проводился с использованием программы численного моделирования быстротекающих газодинамических процессов GasDynamicsTool. В основе программы - явная схема на базе

метода крупных частиц. Сравнение проводилось для РС1 и кластера Fujitsu с задействованными 80 ядрами из 96 возможных. В качестве тестовой была выбрана задача о развитии детонации пропано-воздушного облака сферической формы в течении 0.25 с после ее начала. Использовалась равномерная кубическая расчетная сетка с числом элементов  $3.2 \cdot 10^7$ . Количество шагов расчета по времени: 5000.

Время расчета задачи на персональной ЭВМ: 541.6 мин  $\approx$  9 часов.

Время расчета задачи на кластере Fujitsu: 59.1 мин  $\approx$  1 час.

Таким образом, при решении данной задачи на кластере Fujitsu было получено общее 9-кратное ускорение расчетов по сравнению с персональной ЭВМ. Следует отметить, что кластер Fujitsu позволяет решать в программе GasDynamicsTool практические задачи с количеством узлов расчетной сетки до  $3 \cdot 10^9$ , что невозможно при использовании современных персональных компьютеров.

**Заключение.** Персональный кластер Fujitsu по сравнению с МВС-100К на равном используемом пользователем количестве процессоров имеет меньшую в 2-3 раза производительность. Вместе с тем, по сравнению с однопроцессорным вариантом компьютера он позволяет увеличить скорость вычислений в 10 и более раз, что позволяет значительно расширить класс решаемых задач за приемлемое время. Для кластера Fujitsu характерен разброс данных, что предположительно связано с влиянием на работу температурного режима. Основным недостатком при использовании кластера Fujitsu является достаточно высокий уровень шума (71 дБ) при его интенсивной нагрузке, что предполагает его установку в специальном помещении с системой кондиционирования и звукоизоляции.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Максимов Ф.А., Чураков Д.А., Шевелев Ю.Д. Разработка математических моделей и численных методов для решения задач аэродинамического проектирования на многопроцессорной вычислительной технике // ЖВМиМФ, 2011, том 51, №2, с.303-328.

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАСЧЕТА НАДУЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ В ПАКЕТЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГАЗОДИНАМИКИ

**Д.Н. ЖУКОВ, В.В. ЧЕРНОВ, М.В. ЖАРКОВ**

*ОАО «ЦНИИ «Буревестник»*

*603950, Нижний Новгород, Сормовское шоссе, 1А*

*т. (831) 242-16-05, факс (831) 241-55-50, E-mail: lab\_0444@mail.ru*

При проектировании надульных устройств, в первую очередь, дульных тормозов (ДТ), возникает необходимость получения характеристик конструкции без проведения экспериментальных исследований. Особенно это актуально для артиллерийских систем среднего калибра, где возможности создания стендов свободного отката достаточно проблематичны, а проведение масштабных стрельбовых испытаний связано с большими затратами материальных, финансовых и временных ресурсов.

Однако расчётные методики, регламентированные действующими нормативными документами, не позволяют решать подобные задачи с требуемой точностью. Их основным недостатком является использование значительного объёма эмпирических коэффициентов, не дающих возможность корректно описать все возможные варианты конструкции характерных надульных устройств.

Переход на предсказательное моделирование функционирования надульных устройств, безусловно, связано с использованием пакетов вычислительной газодинамики. Современный уровень их развития позволяет в полной мере учесть все особенности рассматриваемых процессов. Однако при этом возникает ряд проблем, связанных с корректной постановкой граничных условий, учётом движения снаряда и т.д. Решение задачи требует значительных ресурсов, что обуславливает в перспективе необходимость использования технологии параллельных вычислений на суперЭВМ.

В данной работе рассмотрен подход к моделированию процесса функционирования ДТ на примере расчета камерного ДТ щелевого типа 152-мм пушки 2А36. Для решения данной задачи был использован пакет вычислительной газодинамики ANSYS CFX.

В качестве граничных условий задавалось давление, температура и скорость пороховых газов на входе в дульный тормоз, рассчитанные по модели внутренней баллистики для соответствующего сечения. Снаряд двигался с постоянной скоростью, соответствующей скорости снаряда на входе в ДТ. На выходе из расчетной области задавалось условие свободного истечения.

Основную сложность решения рассматриваемой задачи составляет моделирование движения снаряда внутри ДТ. При движении снаряда происходит деформация расчетной сетки с ухудшением ее качества, что, при относительно больших перемещениях, может привести к остановке решения.

Так как траектория движения снаряда известна заранее, то для моделирования его перемещения внутри ДТ при решении задачи возможно применить следующий алгоритм:

- путь, который должен пройти снаряд, разбивается на несколько участков, в пределах которых перемещение снаряда не приводит к существенным деформациям расчетной сетки;
- для каждого участка пути строится своя расчетная сетка;
- производится последовательный расчет перемещения снаряда для каждого участка с приложением результатов расчета, полученных в конце предыдущего участка, в качестве начальных условий для следующего участка.

Таким образом, малыми перемещениями снаряда, при которых расчетная сетка сохраняет свое качество, моделируется полное перемещение снаряда внутри ДТ.

В результате решения были получены параметры потока газа при его истечении из ДТ, а также график изменения тянущего усилия ДТ.

На рисунке 1 приведен график изменения тянущего усилия ДТ при прохождении его снарядом.

В результате обработки полученных данных получено значение энергетической эффективности ДТ  $E = 49,55\%$ . Для оценки точности получаемых результатов планируется проведение комплекса расчётов по предложенной методике для различных вариантов исходных данных с последующим сравнением с имеющимися экспериментальными результатами, полученными на модельных ДТ.

Описанный алгоритм позволяет проводить расчеты для различных вариантов граничных и начальных условий на одном наборе сеток, который требуется построить только при подготовке первого варианта решения, дополнительного привлечения сеточного генератора при проведении расчета не требуется, что существенно сокращает необходимый объем вычислительных ресурсов.

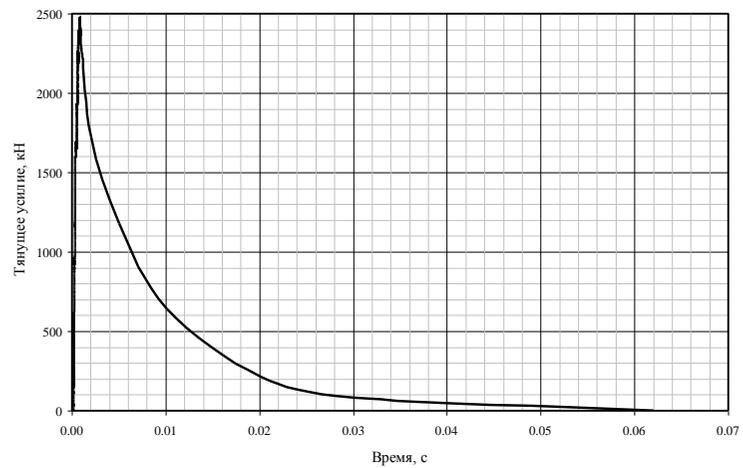


Рис. 1. Изменение тянущего усилия ДТ

## ПАКЕТНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НА ОСНОВЕ ОБОБЩЕННОЙ ПРОЦЕДУРЫ КОРРЕКЦИИ ДАВЛЕНИЯ (ОБЪЕДИНЕНИЕ VP2/3 и $\sigma$ -FLOW) ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ АЭРОТЕРМОГАЗОДИНАМИКИ

**С.А. ИСАЕВ, А.Г. СУДАКОВ, С.В. ГУВЕРНЮК, П.А. БАРАНОВ, А.А. ДЕКТЕРЕВ, А.А. ГАВРИЛОВ, Б.Э. КЭРТ, А.Е. УСАЧОВ**

*Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, 19210, Санкт-Петербург, ул.Пилотов, д. 38,  
т. (812) 771-03-11, факс (812)704-15-12, E-mail isaev3612@yandex.ru*

Концепция открытого программного обеспечения для решения задач аэромеханики и теплофизики нашла отражение в объединении специализированных многопрофильных пакетов VP2/3 (скорость-давление, двумерная и трехмерная версия) и  $\sigma$ -FLOW, основанных на использовании обобщенной процедуры коррекции давления. Несмотря на то обстоятельство, что они фактически представляют библиотеки конкретных задач, у них, как у универсальных аналогов, есть ядро – решатель и каталоги математических моделей турбулентности, неоднородных и многофазных сред, естественной конвекции, радиационного переноса, кавитации, течений со свободной границей и др., т.е. они являются достаточно сложными экспертными системами моделирования физико-технических процессов. Также в пакете VP2/3 реализованы оригинальные многоблочные вычислительные технологии решения факторизованными конечно-объемными методами исходных уравнений на разномасштабных пересекающихся структурированных сетках с неструктурированными вставками. Обобщенная процедура коррекции давления развита одновременно для расчета отрывных до- и сверхзвуковых течений вязкого газа и для течений несжимаемой вязкой жидкости. При моделировании турбулентности, несмотря на наличие опыта решения задач с помощью модели крупных вихрей (в основном в  $\sigma$ -FLOW), акцент сделан на подходе URANS (осредненных по Рейнольдсу нестационарных уравнений Навье-Стокса) с замыканием уравнений с помощью модели переноса сдвиговых напряжений, модифицированной с учетом влияния кривизны линий тока. Продемонстрирована приемлемость подхода для прогнозирования характеристик пространственных периодических тепло- и массообменных процессов. Тестовые расчеты выполнены в сотрудничестве с экспериментаторами из НИИ механики МГУ (рис.1), СПбГПУ, ИТ СО РАН, ЦНИИ им. А.Н.Крылова, (все Россия), университетов Саутгемптона (Великобритания) и Ростока (Германия), CIRA (Италия) на основе

компьютерных симуляторов экспериментальных установок и условий проведения физических опытов. Объединенный пакет VP2/3 и  $\sigma$ -FLOW рассматривается как пилотный образец универсального пакета открытого типа – отечественного аналога международного пакета OPEN FOAM – для решения задач аэрогидромеханики и теплофизики.

В данной работе пакет VP2/3 адаптируется к расчётам на супер-ЭВМ пентафлопного класса. Тестирование одной из версий программного комплекса проводится на классической тестовой задаче о циркуляционном течении вязкой жидкости внутри квадратной каверны с подвижной крышкой. Получены асимптотические кривые зависимости вычислительного ускорения процесса численного решения от числа расчетных ядер кластера. Расчеты течения выполнены на различных сетках (500×500, 1000×1000, 2000×2000, 4000×4000). Тестирование программного комплекса проведено на кластере ИПМ РАН им. М. В. Келдыша и суперкомпьютере Ломоносов НИВЦ МГУ. В расчётах удалось получить вычислительные ускорения, сравнимые с количеством ядер используемого суперкомпьютера.

*Работы выполнены при финансовой поддержке РФФИ (№№10-08-00510 и 11-01-00039).*

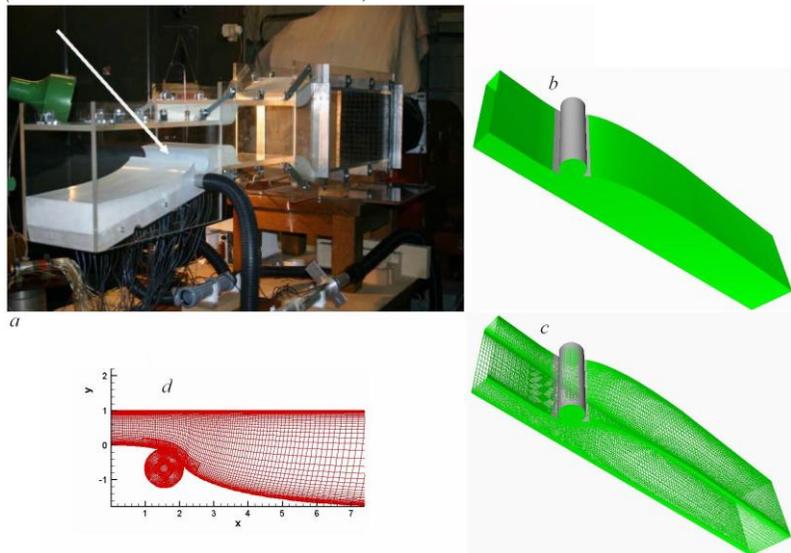


Рис.1. Картина экспериментального стенда в НИИ механики МГУ и его компьютерные аналоги (3D и 2D)

## СОЗДАНИЕ ВИРТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ МАНИПУЛЯТОРА С ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ ADAMS И ПАКЕТА МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**А.Н. КНЯЗЕВ, К.А. МОГИЛЬНИКОВ**

*ЗАО «Специальное конструкторское бюро»,*

*614014 г. Пермь ул. 1905 года, 35*

*т. 89124897732, факс ( 342) 260 75 15, e-mail: [knvazev\\_an@mz.perm.ru](mailto:knvazev_an@mz.perm.ru)*

В данной статье рассмотрен процесс создания и моделирования виртуальной модели манипулятора с гидравлической системой управления с помощью пакетов Adams и пакета моделирования гетерогенных технических систем.

Adams – пакет программ для комплексного моделирования сложных механических систем.

Easy5 и Matlab Simulink – пакеты программ для моделирования гетерогенных технических систем (ПМГТС) и устройств на схемном уровне. Данные пакеты имеют специализированные библиотеки для моделирования гидравлических и пневматических систем.

Манипулятор – это механизм для управления пространственным положением орудий и объектов труда.

Манипуляторы включают в себя подвижные звенья двух типов:

- звенья, обеспечивающие поступательные движения;
- звенья, обеспечивающие угловые перемещения.

Сочетание и взаимное расположение звеньев определяет степень подвижности, а также область действия манипуляционной системы. Общее число степеней подвижности манипулятора складывается из числа степеней подвижности устройств для позиционирования и ориентации. Частью манипуляторов (хотя и необязательной) являются захватные устройства. Вместо захватных устройств манипулятор может быть оснащен рабочим инструментом. Для обеспечения движения в звеньях могут использоваться электрический, гидравлический или пневматический привод.

Целью данной работы является разработка алгоритма создания и моделирование виртуальной модели манипулятора с гидравлическим приводом.

Процесс создания, тестирования и анализа виртуальной модели манипулятора мы рекомендуем разделить на следующие этапы:

- разделение модели манипулятора на механическую и

гидравлическую часть;

- создание параметрической механической модели в Adams и её тестирование;
- создание модели гидропривода в ПМГТС и её тестирование;
- выбор и задание параметров обмена между гидравлической и механической моделью;
- сборка единой модели, включающей гидравлической и механической модели и её тестирование;
- проведение расчёта динамики единой модели;
- оценка полученных результатов;
- корректировка параметров единой модели по результатам расчёта.

Процесс создания параметризованной механической модели манипулятора в препроцессоре Adams/VIEW обычно разделяется на следующие этапы:

- создание геометрии манипулятора;
- наложение кинематических связей;
- наложение внешних силовых воздействий;
- создание необходимого набора измерителей и переменных для контроля параметров модели.

Процесс создания геометрии начинается с разделения механической модели на твёрдые или деформируемые движущиеся тела. Построение тел может осуществляться, как с помощью внутреннего геометрического аппарата, так и экспорта геометрии из CAD и CAE пакетов с последующей параметризацией. Для экспортируемой геометрии из CAD и CAE пакетов параметризуется только положение и ориентация объектов.

Процесс наложения кинематических связей представляет собой создание необходимых шарниров между твёрдыми или деформируемыми телами механической модели обеспечивающих нужные степени подвижности манипулятора.

Процесс наложение внешних силовых воздействий представляет собой наложение необходимых сил, моментов, упругих и контактных взаимодействий между объектами модели.

Процесс создания гидравлической модели привода манипулятора в ПМГТС целесообразно начинать с разделения модели на следующие блоки:

- блок рабочей жидкости;
- блок питающая установка;
- блок распределительной аппаратуры;
- блоки исполнительных двигателей по всем степеням подвижности;

Структура обмена данными между ПМГТС и Adams выглядит следующим образом (рисунок 1):

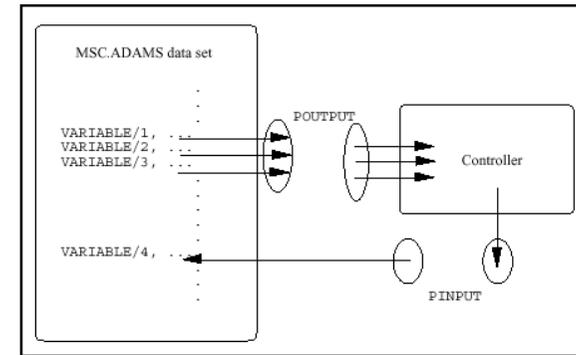


Рис. 1. Структура обмена данными ADAMS и ПМГТС

VARIABLE/1..3 – выходные переменные из Adams,  
VARIABLE/4... - входные переменные в Adams,  
Adams data set – модель, созданная в Adams,  
POUTPUT – объект выхода (данные, которые передаются из Adams),  
PINPUT – объект входа (данные, которые передаются в Adams),  
Controller – модель гидропривода, созданная в ПМГТС.

Параметры обмена в Adams задаются в виде State Variable. Для входных параметров из модели, созданной в ПМГТС, задаются значения 0. Создаются необходимые силовые воздействия в механической модели с участием входных параметров из ПМГТС (усилия и моменты исполнительных двигателей, усилия и моменты трения, зависящие от параметров гидравлической модели). Выходные параметры в ПМГТС задаются в виде функций и измерителей необходимых величин. В основном, это переменные, управляющие сценарием цикла работы гидропривода по степеням подвижности манипулятора, являющиеся входными параметрами в блок управления гидроприводом и кинематические параметры исполнительных двигателей, являющиеся входными параметрами в соответствующие блоки ПМГТС.

В качестве примера был рассмотрен манипулятор представленный на рисунке 2. Данный манипулятор состоит из 5 подвижных звеньев управляемый 4 возвратно-поступательными гидроцилиндрами двустороннего действия и винтовым гидроцилиндром двустороннего действия колонны крана. Созданы механическая параметризованная модель манипулятора в ADAMS и модель его гидропривода в ПМГТС и проведено соединение моделей в единую.

Проведено моделирование одного из вариантов работы манипулятора по следующему сценарию:

- повышение оборотов насоса до рабочих с 5 с до 5,5 с;
- переключение распределителя гидроцилиндра 2 (соединение напорной магистрали со штоковой полостью) с 6 с до 6,5 с;
- переключение распределителя гидроцилиндра 2 (в нейтральное положение) с 14 с до 14,5 с;
- переключение распределителя гидроцилиндра 3 (соединение напорной магистрали со штоковой полостью) с 17 с до 17,5 с;
- переключение распределителя гидроцилиндра 3 (в нейтральное положение) с 27 с до 27,5 с;
- переключение распределителя гидроцилиндра 2 (соединение напорной магистрали с поршневой полостью) с 28 с до 28,5 с;
- переключение распределителя гидроцилиндра 2 (в нейтральное положение) с 33 с до 33,5 с;
- переключение распределителя гидроцилиндра 3 (соединение напорной магистрали с поршневой полостью) с 34 с до 34,5 с;
- переключение распределителя гидроцилиндра 3 (в нейтральное положение) с 39 с до 39,5 с.

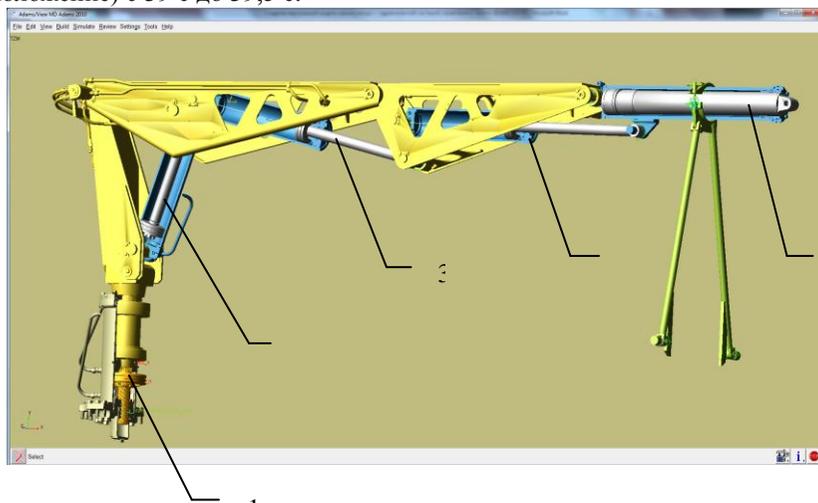


Рис. 2. Пример механической части манипулятора в Adams

На рисунке 2 обозначено:

- 1- винтовой гидроцилиндр колоны крана;
- 2 – гидроцилиндр 1;
- 3 – гидроцилиндр 2;
- 4 – гидроцилиндр 3;
- 5 – гидроцилиндр 4;

Моделирование проводилось с номинальным грузом, прикрепленным к штоку гидроцилиндра 4. В гидроцилиндрах были приложены силы трения в уплотнениях, зависящие от давления в рабочих полостях.

Были получены следующие результаты:

давления рабочей жидкости в полостях исполнительных двигателей 2, 3 (рисунок 3);

давления рабочей жидкости в полостях исполнительных двигателей 1, 4 (рисунок 4);

расход рабочей жидкости в полостях исполнительных двигателей 2, 3 (рисунок 5).

перемещения штоков гидроцилиндров 2, 3 (рисунок 6).

скорости штоков гидроцилиндров 2, 3 (рисунок 7).

Данные результаты позволяют оценивать следующие рабочие характеристики гидропривода манипулятора:

необходимая мощность привода;

необходимые настройки предохранительных клапанов;

потери давления в магистралях гидропривода;

кинематические характеристики манипулятора в зависимости от степени перекрытия золотников распределителей и особенностей гидропривода;

нагрузки необходимые для расчёта прочности узлов и агрегатов манипулятора.

На рисунках 3-7 обозначено:

$p_{si}$ ,  $p_{pi}$  – давление рабочей жидкости в штоковой и поршневой полости  $i$ -го гидроцилиндра;

$Q_{si}$ ,  $Q_{pi}$  – расход рабочей жидкости в штоковой и поршневой полости  $i$ -го гидроцилиндра;

$Q_n$ ,  $p_n$  – расход рабочей жидкости и давление на выходе из насоса.

$x_i$  – перемещение поршня в  $i$ -м гидроцилиндре.

$v_i$  – скорость поршня в  $i$ -м гидроцилиндре.

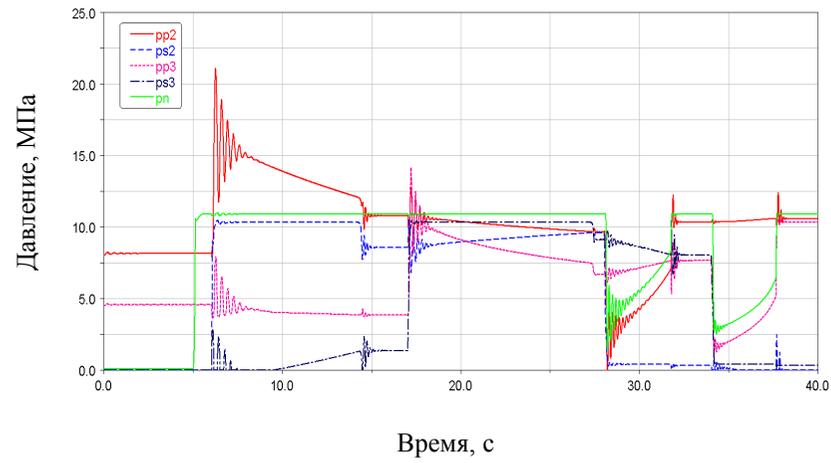


Рис. 3. Давления рабочей жидкости в полостях гидроцилиндров 2, 3

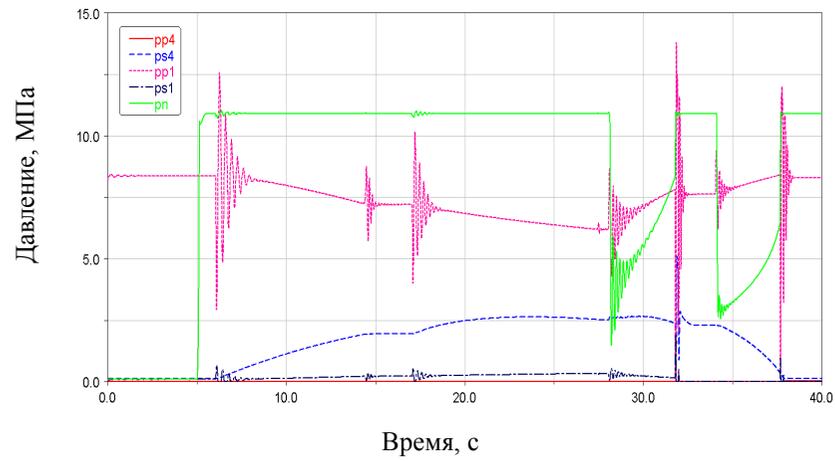


Рис. 4. Давления рабочей жидкости в полостях гидроцилиндров 1, 4

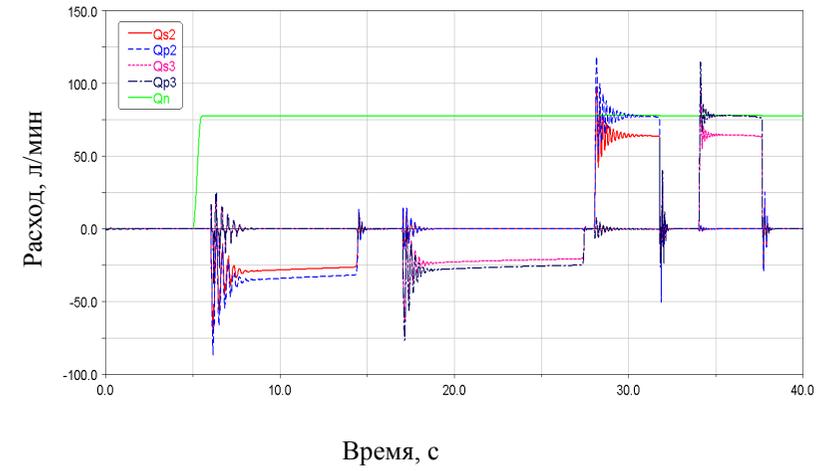


Рис. 5. Объемные расходы рабочей жидкости в полостях гидроцилиндров 2, 3

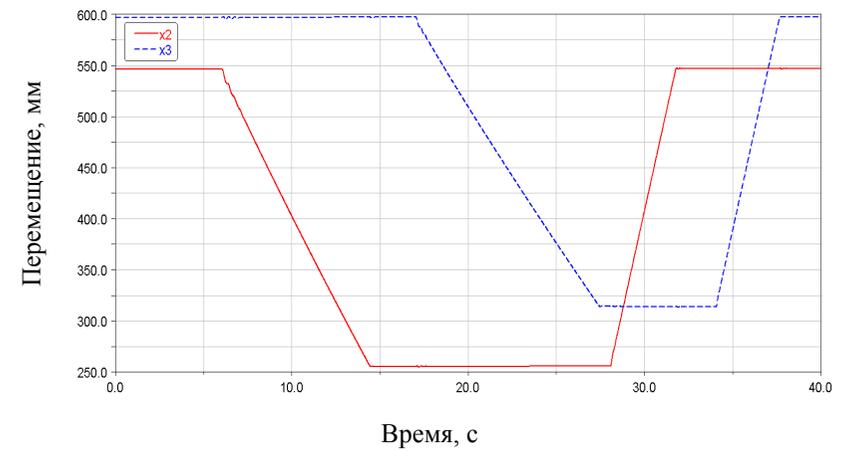


Рис. 6. Перемещение штоков гидроцилиндров 2, 3

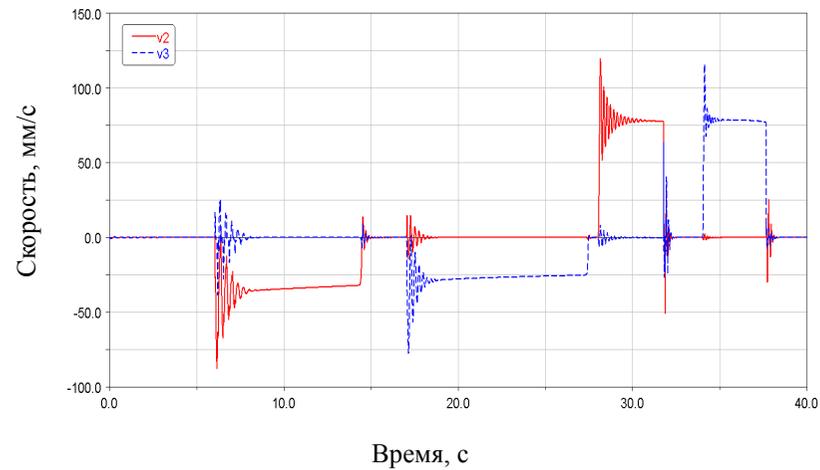


Рис. 7. Скорость штоков гидроцилиндров 2, 3

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Георгиев А.Ф. Моделирование динамических систем с помощью MSC.Adams и Easy5. MSC.Software. Москва 2005.
2. Большая Энциклопедия Нефти Газа. Степень подвижности — манипулятор. URL: <http://www.ngpedia.ru/id480813p1.html>
3. Большая Энциклопедия Нефти Газа. Погрузочный манипулятор. URL: <http://www.ngpedia.ru/id133087p1.html>

## ОБЛАЧНЫЕ МНОГОПРОЦЕССОРНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГАЗОФАЗНОГО ДИФфуЗИОННОГО ГОРЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ OPENFOAM.

**К.А. КУФТЫРЕВ**

Концерн «СТРУЙНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»  
199155, Санкт-Петербург, ул. Одоевского, д. 19,  
т. (952) 355-06-20, E-mail [kauan@yandex.ru](mailto:kauan@yandex.ru)

Облачные вычисления (cloud computing) – технология, которая, в частности, позволяет использовать вычислительные ресурсы, находящиеся на удаленных серверах. В настоящее время облачные технологии недостаточно используются для прикладных инженерных расчетов. Это значит, что остаются неиспользованными значительные потенциальные преимущества облачных технологий: экономическая эффективность, высокая производительность, отказоустойчивость.

Цель данного инициативного проекта заключается в разработке и адаптации новой вычислительной технологии моделирования на основе пакета с открытым кодом OpenFOAM [1] для расчетов процессов газофазного горения в сложных смешивающихся потоках топлива и окислителя с использованием «облачных» высокопроизводительных ресурсов.

В качестве объекта исследования выбрана горелка «ГВД-4.4» (рис.1). Расчеты проводились в «облаке» вычислительной платформы «Университетский кластер» [2]. Для решения задач горения был выбран решатель FireFOAM.

Рассматривалось развитие факела в открытом пространстве, первоначально заполненном покоящимся воздухом при нормальных условиях. В качестве горючего использовали метан, окислителя - воздух. Режим работы горелки характеризуется числом Маха  $M=0.2$  и числом Рейнольдса  $Re=25000$ . Для моделирования турбулентности применяется метод RANS с использованием статической модели турбулентности  $k-\omega$  SST. Излучением факела пренебрегается, поскольку развитие струи рассматривается в полностью открытом пространстве, и излучение факела не оказывает существенного влияния на результирующее температурное поле. Процесс горения описывается одностадийной необратимой химической реакцией полного сгорания. Модель горения описывается в рамках концепции EDC [4]. Скорость выгорания горючего определяется скоростью турбулентного смешения реагентов, в то время как реакция в перемешанных реагентах протекает достаточно быстро и

не лимитирует скорость выгорания. Таким образом, предполагается, что режим горения является диффузионным.

Цель моделирования - получение стационарных трехмерных полей температуры, скорости, давления и состава среды для сравнения с аналогичными результатами, полученными в других, более апробированных программных пакетах для последующего уточнения постановки задачи валидации используемой методики моделирования.

Полученные в результате расчетов поля температуры и массовой доли горючего сравниваются с результатами аналогичных расчетов, выполненных в других программных комплексах. Все сравниваемые технологии дают близкие результаты, что говорит об адекватности используемых в fireFOAM моделей и методов применительно к задачам дозвукового газофазного горения.

Дальнейшее развитие технологии расчетов процессов горения в OpenFOAM будет направлено на совершенствование модели химических процессов с целью учета химического недожога.



Рис. 1. Модель горелки «ГВД-4.4» разработки компании КСТ [3].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. openfoam.org
2. unihub.ru
3. www.СТ.РФ
4. B.F. Magnussen: On the Structure of Turbulence and a Generalized Eddy Dissipation Concept for Chemical Reaction in Turbulent Flow. 19th AIAA Aerospace Science Meeting, Jan. 12-15 1981.

## МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ МНОГОМЕРНОЙ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ ОТЛИЧАЮЩАЯСЯ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТЬЮ

**М.А. МАКСИМЕНКО**

*Михайловская военная артиллерийская академия  
195009, г. Санкт-Петербург, ул. Комсомола, 22*

Основным методом повышения эффективности функционирования любой СКТС на водном транспорте можно считать предотвращение, а при невозможности – компенсация ошибок автоматизированного контроля. Анализ причин их возникновения, показывает, что к основным из них можно отнести следующие:

- сбои и отказы в аппаратуре контроля;
- ограниченные возможности современной аппаратуры по измерению некоторых неэлектрических величин, и, соответственно, оценка контролируемых параметров (КП) по косвенным признакам;
- ошибка метода измерения (систематическая);
- наличие погрешности измерительного тракта, с помощью которого осуществляется измерение (случайная ошибка).

Последние можно подразделить на методические и инструментальные, основные и дополнительные, аддитивные и мультипликативные, систематические и случайные, абсолютные, относительные и приведенные относительные. Рассмотрим основные из них.

Систематические погрешности возникают из-за несовершенства выбранных методов измерения, технических средств измерения применяемых в водном транспорте и субъективных особенностей экспериментатора. Случайные погрешности являются следствием невыясненных случайных причин. Поэтому для их количественной оценки применяют математический аппарат теории вероятностей и математической статистики. Методические погрешности - погрешности, получаемые за счет несовершенства метода измерения, связанные либо со сложностью измерения данной величины, либо с использованием косвенных измерений, позволяющих по другой физической величине оценивать искомую. Они относятся к систематическим погрешностям. Инструментальные погрешности связаны с несовершенством измерительных приборов, обусловлены зоной нечувствительности, наличием нелинейности в изменении измеряемой величины и линейности шкалы измерения и т.п. Основная погрешность - это погрешность первичного преобразователя (датчика) ИТ в нормальных условиях

измерения, дополнительная погрешность - это погрешность, обусловленная остальными компонентами измерительной цепи или "ненормальными" условиями измерения. Аддитивная погрешность - погрешность, которая суммируется с основной погрешностью, мультипликативная - умножается на основную погрешность.

По характеру возникновения погрешности бывают конструктивные, которые возникают при проектировании из-за недостаточно точного учета условий эксплуатации и неоптимальной проработки конструкции аппаратуры и ее испытания, и производственные, возникающие в процессе изготовления изделия. Это происходит в основном из-за нарушения технологии производства. Кроме того, они возникают из-за нестабильности самого процесса производства и характеристик применяемых материалов и из-за несовершенства существующих систем измерения.

Анализ и систематизация видов отказов сложных технических систем позволяют сделать вывод о том, что важнейшими с точки зрения СКТС СУ плавательных транспортных средств видами отказов являются внезапный и постепенный отказы, а также сбой. Внезапный отказ – отказ, характеризующийся скачкообразным изменением значения одного или нескольких заданных параметров объекта, а постепенный отказ - отказ, характеризующийся постепенным изменением значения одного или нескольких заданных параметров объекта. Необходимо отметить, что разделение на постепенный и внезапный отказ является в некоторой степени условным и зависит от возможностей СКТС к самоконтролю, позволяющему отслеживать процессы изменения параметров (погрешностей каналов) аппаратуры. В качестве примера постепенного отказа можно привести дрейф нуля усилителя, изменение параметров компараторов.

Внезапные отказы обычно имеют характер обрывов, поломок, замыканий и часто проявляются в нарушении цепи прохождения сигнала.

Сбоем называется такой отказ, при котором восстановление системы осуществляется в ходе дальнейшей эксплуатации без смены оборудования и вмешательства обслуживающего персонала.

Отказы типа сбоя происходят, в основном, по двум причинам. С одной стороны, сбой вызывается влиянием внешней среды в виде внешних электромагнитных полей, излучения, вибрации и т.д. С другой стороны, сбой возникает в результате нагруженности отдельных элементов, входящих в СУ (СКТС) в ходе его функционирования. Необходимость исследования влияния сбоев на результат контроля и, соответственно, исключения обусловлена еще и тем фактом, что во многих случаях время контроля функционирования исследуемых систем мало, и в связи с этим влияние данного события на конечный результат становится существенным. Кроме того, появление в составе СУ плавательного транспортного средства ЭВМ, для которой сбой –

наиболее характерный отказ, ставит задачу предотвращения влияния сбоя на результат контроля весьма насущной задачей.

Следует отметить, что самовосстановление СУ (СКТС) после сбоя можно рассматривать с различных позиций. С точки зрения аппаратурной, сбой не является отказом, так как он не связан с повреждением оборудования, и поэтому его восстановление можно считать мгновенным. С точки зрения функционирования СКТС, сбой является отказом, поскольку привел к неправильному результату контроля.

Таким образом, данное направление развития теории автоматизированного контроля, выразившееся в выявлении особенностей возникновения погрешностей, отказов и ошибок контроля, разработке математических моделей их формирования с целью их учета при построении обобщенных информационно-статистических моделей функционирования СКТС, более адекватных реально происходящим процессам, является актуальным.

Предыдущим исследованиями установлено, что наиболее эффективным средством повышения мощности критерия отбраковки является разработка критерия, ориентированного на конкретную информационную ситуацию. Так, для задач оценки качества функционирования СКТС целесообразно сформировать критерий отбраковки аномальных результатов измерения, представленных векторами. Традиционный подход в этом случае заключается в раздельной обработке данных наблюдений по каждой из осей координат, что вносит дополнительную погрешность, обусловленную не учётом взаимной корреляции компонентов случайного вектора результата измерения. Следовательно, повышение достоверности принятия правильного решения об отбраковке аномального результата возможно за счёт принятия специального критерия, учитывающего степень взаимной зависимости измерений многомерной случайной величины. В качестве основы для разработки такого критерия может быть принята ковариационная матрица вида

$$Q = \begin{pmatrix} D_1 & K_{12} & \dots & K_{1k} \\ K_{21} & D_2 & \dots & K_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{k1} & K_{k2} & \dots & K_k \end{pmatrix}$$

где  $D_i$  - дисперсии  $i$ -го КП;

$K_{xy}$ , - корреляционный момент, пропорциональный степени взаимной зависимости величин  $x$  и  $y$ .

Создадим вторую матрицу  $\tilde{Q}$  - в которой проведено исключения некоторых аномальных значений

Если в качестве меры отличия второй матрицы от матрицы, в которой проведено исключение некоторого результата измерения  $f$  взять величину

$$v = \frac{\det \tilde{Q}}{\det Q} = \frac{M_{ff}(Q)}{\det Q}$$

где  $\det Q$ ,  $\det \tilde{Q}$  - определители матриц  $Q$  и  $\tilde{Q}$  соответственно;

$M_{ff}(Q)$  - минор элемента  $q_{ff}$  матрицы  $Q$ .

Применение полученного выражения существенно сокращает объем вычислительных процедур в процессе обработки получаемой информации в ходе эксперимента, направленного на установление вида зависимости между приращением информативности  $\Delta I$  и  $v_f$ .

Таким образом, алгоритм повышения достоверности многомерной входной информации путем исключения влияния сбоя на результат контроля включает следующие операции:

- вычисление оценок дисперсии и корреляционного момента для матрицы многомерных измерений с учетом «подозрительного» результата;
- вычисление оценок дисперсии и корреляционного момента для матрицы многомерных измерений без учёта подозрительного результата;
- расчет коэффициента аномальности  $v_i$
- ранжирование полученных мер и исключение крайних значений по определенному решающему правилу.

После получения достаточной статистики о результатах многомерных измерений контролируемых параметров возможна отбраковка результатов контроля в реальном масштабе времени или проверка качества получаемой информации от различных устройств с целью принятия решения о текущем местоположении высокодинамичного объекта.

## О СОВРЕМЕННЫХ МОДЕЛЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Л.А. МЕРЖИЕВСКИЙ**

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН  
630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева 15,  
т. (383) 333-18-99, факс (383) 333-16-12, E-mail [merzh@hydro.nsc.ru](mailto:merzh@hydro.nsc.ru)*

Современное состояние моделирования процессов динамического и ударно-волнового деформирования и разрушения конденсированных сред характеризуется высоким уровнем развития вычислительных возможностей. Для проведения расчетов широко используются мощные суперкомпьютеры, реализуется распараллеливание вычислений на сотни тысяч процессоров. Глубоко и всесторонне проработаны численные методы. Созданы многофункциональные и многопрофильные пакеты программ и коды, в том числе и коммерческие. На этом фоне явно прослеживается относительное отставание в моделях, адекватно описывающих реальные процессы. Превалируют варианты модификаций классических феноменологических моделей, базирующихся, в основном, на данных квазистатических экспериментов. Зачастую такие модели в принципе не могут дать адекватного описания динамических процессов. Это не означает, что нет попыток выхода на модели нового уровня, учитывающие физические механизмы необратимого (пластического) деформирования. Они есть, но это отдельные работы, в то время, как для массовых расчетов, и даже во вновь разрабатываемых пакетах и кодах, продолжают использоваться модификации старых моделей, не отвечающие современному уровню представлений о механизмах деформирования при динамических нагрузках.

В докладе рассматриваются современные модели необратимых процессов деформирования и разрушения материалов при их динамическом, в том числе – ударно-волновом, нагружении. Условно используемые в настоящее время для таких расчетов модели можно разделить на три больших группы: макроскопические, микроструктурные, атомистические. К первым относятся традиционные модели упругопластического деформирования (модели механики сплошных сред). Во второй группе – модели, основывающиеся на описании микроструктурных механизмов необратимого деформирования (чаще всего – на представлениях о кинетике дислокационного ансамбля). К третьей группе относятся молекулярно – динамические модели и расчеты. Рассматриваются возможности, преимущества и недостатки моделей каждой из групп. Особую категорию составляют наиболее

перспективные, с точки зрения автора, многоуровневые модели, позволяющие объединить преимущества каждого из перечисленных подходов и включать в рассмотрение механизмы деформирования разных уровней. Приводятся примеры расчетов по таким моделям. Предлагается методика предварительного тестирования моделей с точки зрения адекватности описания ударно-волновых процессов. Обсуждаются перспективные направления развития подходов к моделированию процессов деформирования и разрушения при динамическом нагружении. Представляется, что это нелинейные модели и модели, учитывающие фрактальность значительной части реальных сред, что требует привлечения соответствующего математического аппарата дробного интегро-дифференциального исчисления. Приводятся примеры таких моделей и результаты расчетов с их использованием.

## **СОЗДАНИЕ ВИРТУАЛЬНОГО ПРОТОТИПА И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОТИВООТКАТНОГО УСТРОЙСТВА В ПАКЕТЕ MSC.EASY5**

**Ф.В. НАБОКОВ, О.Ю. СМЕТАННИКОВ, К.А. МОГИЛЬНИКОВ**

*ЗАО «Специальное конструкторское бюро»*

*614014, Пермь, ул. 1905 года, д. 35*

*т./факс (342) 260-61-41, E-mail: [sdg@mz.perm.ru](mailto:sdg@mz.perm.ru)*

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,*

*E-mail: [sou@cpl.pstu.ac.ru](mailto:sou@cpl.pstu.ac.ru)*

В связи с ростом требований к вновь создаваемым и модернизируемым артиллерийским системам, увеличением импульса отдачи, уменьшением массы орудий, увеличением скорострельности и дальности стрельбы, повышением точности стрельбы, актуальной становится проблема повышения качества защиты лафета (базы, основания) артиллерийского орудия при выстреле при всех условиях функционирования системы. Это зачастую достигается посредством совершенствования конструкций и методов расчета противооткатных устройств.

Несмотря на солидный объем имеющихся работ по теории, методам расчета противооткатных устройств [1-6], приходится

констатировать тот факт, что на практике отсутствует системный подход и методология проектирования и расчета противооткатных устройств с учетом условий стрельбы и функционирования артиллерийских систем, продолжительности жизненного цикла орудия. Эти условия и требования подразумевают на стадии проектирования учитывать параметры ПОУ и орудия, изменяющиеся в процессе эксплуатации системы, например, в результате износа, изменения уровня нагрузок. Они также связаны с необходимостью обеспечения выполнения разнообразных задач в процессе эксплуатации

При проектировании новых систем, содержащих, как правило, оригинальные ПОУ, т.е. конструкции, обладающие новизной по сравнению с известными, одной из основных задач, стоящих перед конструктором-расчетчиком, является создание в короткие сроки математической модели динамики откатных частей при выстреле и проведение расчетов.

Гидравлические и пневматические противооткатные устройства артиллерийских систем представляют собой, как правило, систему полостей, заполненных жидкостью или газом и соединенных проточными каналами, включающими регулирующие элементы, зазоры.

Кроме того, в ПОУ имеются подвижные элементы (клапаны, плавающие поршни и другие элементы), характеризующиеся инерционностью, взаимодействием с другими частями орудия, потоками жидкости и газа. Это взаимодействие вносит определенные поправки в динамику ПОУ при выстреле.

Быстрое и качественное проектирование ПОУ можно осуществить при наличии или с использованием универсальных методик и программ, позволяющих рассчитать основные параметры и характеристики процессов, протекающих в различных узлах ПОУ при выстреле.

Одна из первых таких методик была разработана Л.В. Марченко [4]. Математическое описание гидромеханических процессов в ней основано на известных из механики жидкости и газа общих уравнениях движения сплошной среды с использованием экспериментальных значений коэффициентов гидравлических сопротивлений, коэффициентов расходов и коэффициентов гидродинамических сил. Задача определения характеристик решается для средних значений давлений в емкостях при квазистационарных условиях течения в пневмогидролиниях. При построении математической модели рассматриваются два типа емкостей: заполненных жидкостью и газом и заполненных только жидкостью. Параметры емкостей (объемы жидкости, газа, давление) первого типа определяются дифференциальными уравнениями изменения объемов и законов сохранения массы и энергии для жидкости и газа. Для емкостей второго типа давление определяется

алгебраическим уравнением равенства объемных расходов жидкости из емкости и в емкость и изменения объемов емкости за счет движения поршней.

С другой стороны, применение подхода Л.В. Марченко к моделированию переходных процессов в полостях ПОУ не позволяет достаточно просто описать и внести дополнительные уравнения элементов и внести необходимые изменения в алгоритм и программу.

Более удобным и универсальным подходом к построению математической модели поведения служит учет в уравнениях неразрывности потока жидкости и в переходных процессах сжимаемости жидкости [1,3] и разработки на этих допущениях пакетов прикладных программ моделирования гидропривода, например, таких, как HIDRA [2] и др.

Следует отметить, что методика расчета гидравлических тормозов с учетом сжимаемости рабочей среды основана на определении давлений в основной полости и во вспомогательных полостях из решения дифференциальных уравнений неразрывности, в то время как отказ от учета сжимаемости приводит к необходимости определения давлений из решения трансцендентных уравнений баланса массы жидкости на каждом шаге интегрирования исходной системы дифференциальных уравнений отката (наката), что в несколько раз увеличивает время расчета на ЭВМ. Нередко возможна ситуация с невозможностью нахождения решения трансцендентных уравнений при использовании тех или иных алгоритмов.

Многолетний опыт разработки противооткатных систем показывает, что существенный вклад в стратегию проектирования ПОУ вносит также поведение платформы, на которой установлено орудие. В последние годы на большинстве машиностроительных предприятий, занятых выпуском высокотехнологичной продукции, широко применяются лицензионные инженерные пакеты, существенно ускоряющие цикл разработки изделий. В частности, для расчета динамики сложных транспортных систем на предприятиях отрасли используется программный комплекс MSC.ADAMS. При этом в среде самой программы создается виртуальный прототип механической системы подвески и трансмиссии рассматриваемого объекта, а моделирование элементов управления осуществляется во внешних модулях, связанных с основной моделью посредством интерфейса ADAMS/Controls. Противооткатное устройство, как было показано выше, относится к сложным нелинейным системам, описание которых традиционными средствами ADAMS/View не представляется возможным. Поэтому математическая модель ПОУ, как и модели систем управления, описывается во внешнем подключаемом модуле. Инструментом для его

создания может служить, например, пользовательская подпрограмма или библиотека на языке FORTRAN. Более производительной и универсальной является методика визуального построения схемы устройства в среде специализированных пакетов.

Одним из наиболее широко используемых при проведении исследований динамических систем является программный комплекс на базе математического пакета MATLAB Simulink. При работе в среде Simulink информация об исследуемом объекте формируется путем сборки схемы объекта и задания параметров, входящих в схему стандартных и пользовательских компонентов. Модель может иметь иерархическую структуру, включающую подмодели более низкого уровня, причем уровней практически не ограничено. Вместе с тем моделирование системы ПОУ – орудие в связке MSC.ADAMS-MATLAB Simulink имеет ряд недостатков. В частности, при совместном решении задач движения орудийного ствола и работы противооткатного устройства оказывается невозможным регулирование шага по времени. Это особенно актуально из-за существенного различия характерных времен отката (порядка 0.1 с) и наката с последующим переходом системы в стационарное состояние (порядка 5-10 с). В результате время решения задачи значительно увеличивается и, с учетом большого объема динамической модели подвески орудия, может достигать десятков часов. Второй причиной возрастания времени счета является работа пакета MATLAB Simulink в режиме интерпретации. Указанные недостатки устранены в аналогичном специализированном пакете визуального программирования MSC.EASY5, максимально адаптированном к взаимодействию с MSC.ADAMS. MSC.EASY5 включает большое количество как готовых компонентов общего назначения (сумматоров, делителей, фильтров, интеграторов и т.п.), так физических устройств (клапаны, гидроцилиндры, теплообменники, редукторы, муфты сцепления и др.). В данной работе была исследована принципиальная возможность применения данного пакета для моделирования ПОУ.

Таким образом, разработана методика построения модели основного элемента противооткатного устройства – тормоза отката из компонентов библиотеки Thermal Hydraulic программы MSC.EASY5. Путем сравнения с эталонным решением показана достоверность полученных результатов. Использование данного подхода, благодаря визуально-модульной структуре математической модели, позволяет существенно ускорить разработку новых конструкций ПОУ во взаимодействии с виртуальным прототипом платформы артиллерийского орудия, созданном в MSC.ADAMS.

Предметом дальнейших исследований является создание и верификация в MSC.EASY5 библиотеки схем существующих и

перспективных конструкций ПОУ с учетом разогрева рабочей среды в процессе стрельбы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Гойдо М.Е.* Проектирование объемных гидроприводов. М.: Машиностроение, 2009. – 304 с.
2. Расчет и проектирование строительных и дорожных машин на ЭВМ / Ю.Г. Беренгард, М.М. Гайцгори и др.; Под ред. Е.Ю. Малиновского. – М.: Машиностроение, 1980. – 216 с.
3. *Навроцкий К.Л.* Теория и проектирование гидро- и пневмоприводов. М.: Машиностроение, 1991. – 384 с.
4. *Марченко Л.В.* Математическая модель гидропневматических процессов в устройствах автоматики // Оборонная техника. 1980, № 12. С. 24 – 27.
5. *Кочетков А.В., Савихин И.О., Садовский В.В.* Моделирование работы противооткатных устройств с учетом стадии свободного отката // Проблемы прочности и пластичности. Вып. 69. Нижний Новгород, Изд-во ННГУ. Межвуз. сб., 2007. С. 159-169.
6. *Савихин И.О., Садовский В.В.* Численное исследование нестационарных процессов в противооткатных устройствах // Проблемы прочности и пластичности. Вып. 72. Нижний Новгород, Изд-во ННГУ. Межвуз. сб., 2010. С. 130-136.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УНИФИЦИРОВАННОЙ МОДЕЛИ СРЕДЫ МАТЛАВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ СТРЕЛКОВОГО ВООРУЖЕНИЯ

**В.М. ПОНЯТСКИЙ, Э.Н. ДАВЫДОВ, А.В. ОСАДЧИЙ,  
Г.И. КОЛЕСНИКОВ, В.Г. ФЕДОРИЩЕВА, И.В. КИСЛИНСКИЙ**

*ОАО "Конструкторское бюро приборостроения"*

*300001, г. Тула, ул. Щегловская засека*

*тел. (4872) 46-94-16, факс (4872) 42-61-39,*

*E-mail: [kbkedr@tula.net](mailto:kbkedr@tula.net), [pwmru@rambler.ru](mailto:pwmru@rambler.ru)*

В настоящее время для проектирования механических систем используются различные системы автоматизированного проектирования (CAD), в том числе SolidWorks [1] и Pro/Engineer, а также система математического моделирования (CAE) MatLab [2].

Пакет SolidWorks, равно как и пакет Pro/Engineer, обеспечивает высокую эффективность и качество разработки твердотельных моделей деталей и узлов механизмов.

В CAD-системе SolidWorks имеется возможность подключения дополнительных расчётных модулей для проведения узконаправленного инженерного анализа: расчёт прочности (модуль COSMOSWorks), расчёт кинематики (COSMOSMotion) и т.д.

В CAD-системе Pro/Engineer имеется встроенный пакет для инженерного анализа Pro/MECHANICA, который позволяет производить расчёт механических систем как в статике, так и в динамике.

Система MatLab дополняет функционал модулей инженерного анализа, разработанных специально для вышеназванных CAD-систем, за счет возможности проведения динамического анализа конструкций механизмов в графической среде имитационного моделирования Simulink с учетом взаимодействия подсистем различной физической природы.

Пакет расширения Simulink/SimMechanics позволяет моделировать механизмы, состоящие из множества твердых тел и их компонентов – соединений, ограничителей движения, управляющих элементов и датчиков движения. При этом можно как создавать модели механических систем с помощью библиотеки SimMechanics, так и транслировать 3D-модели из САПР SolidWorks или Pro/Engineer в среду MatLab. Геометрическая 3D-модель преобразуется в имитационную<sup>1</sup> модель. Сопряжения между телами заменяются степенями свободы. Полученная в результате экспорта 3D-модели имитационная модель MatLab

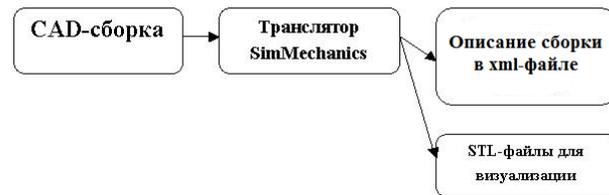
---

<sup>1</sup> Имитационная модель (*Simulation Modeling*) – это математическая модель, которая служит для имитации поведения реального объекта во времени [4].

дорабатывается в соответствии с задачей исследования: проводится формирование внешних сил, введение сил взаимодействия между механическими телами, введение средств регистрации величин перемещения механических тел и действующих на них сил и моментов. В среде MatLab обеспечивается возможность 3D-визуализации функционирования механической системы.

Трансляция 3D-модели в среду MatLab осуществляется при помощи встраиваемого в CAD-систему транслятора в два этапа [3] (рисунок 1).

Этап 1. Экспорт 3D-модели в xml-файл данных.



Этап 2. Импорт xml-файл данных в среду MatLab.



Рис. 1. Этапы трансляции конструкторской 3D-модели в имитационную модель MatLab

На первом этапе осуществляется экспорт 3D-модели из SolidWorks или Pro/Engineer в xml-файл данных. Для этого необходимо сохранить сборку в файле с расширением \*.xml. Получившийся xml-файл данных содержит в себе всё описание сборки: массоинерционные характеристики деталей и характер их соединений.

На втором этапе в среде MatLab осуществляется генерация имитационной модели через импорт полученного xml-файла с помощью команды `import_physmod` или `mech_import`.

В процессе трансляции геометрической 3D-модели в имитационную модель осуществляется преобразование сопряжений между деталями в степени свободы тел. После трансляции получается имитационная модель в среде MatLab. Не все соединения деталей в SolidWorks и Pro/Engineer могут быть правильно интерпретированы CAD-транслятором. Те соединения, которые CAD-транслятор не

распознал, он заменяет жёстким соединением Weld. В дальнейшем в MatLab возможно заменить нераспознанные соединения и задать необходимые степени свободы для деталей.

Вышеизложенная технология была применена для решения задачи анализа динамики вылета гильзы образца стрелково-пушечного вооружения (СПВ) [5].

3D-модель исследуемого механизма приведена на рисунке 2.

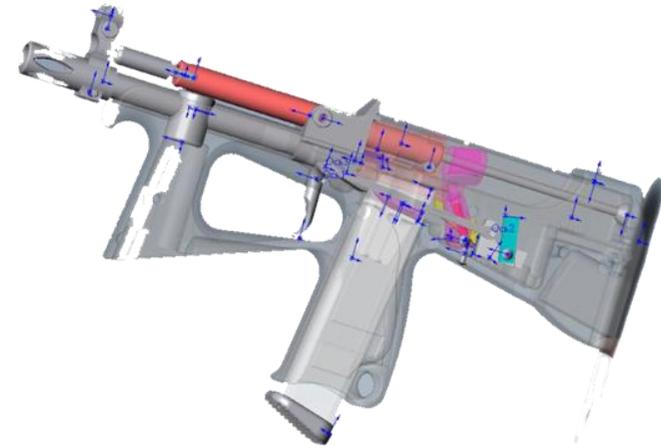


Рис. 2. Общий вид 3D-модели исследуемого механизма

Схема сил, действующих на гильзу в патроннике при её ударе об упор и вылете в боковое отверстие, приведена на рисунке 3.

Обобщённая сила, действующая между двумя телами – линейная функция векторов относительного перемещения  $r$  и относительной скорости движения  $v$  этих тел, определяется выражением:

$$F = (-1)^n (k\Delta r + b\Delta v)P_i \quad (\text{Н}) \quad (1)$$

где  $\Delta r = r - r_o$  – относительное перемещение тел (м);  $r$  – текущее расстояние между телами (м);  $r_o$  – расстояние между телами в момент начала взаимодействия (м);  $\Delta v = v - v_o$  – относительная скорость перемещения тел (м/с);  $v$  – текущая скорость тел друг относительно друга (м/с);  $v_o$  – скорость тел друг относительно друга в момент начала взаимодействия (м/с);  $k$  – коэффициент модуля упругости материала тел (Н/м);  $b$  – коэффициент демпфирования (Н/м/с);  $n$  – коэффициент, определяющий знак функции  $F$ ;  $P_i$  – признак, определяющий наличие действия силы  $F$ . Если сила  $F$  действует, то признак равен единице,

иначе признак равен нулю.

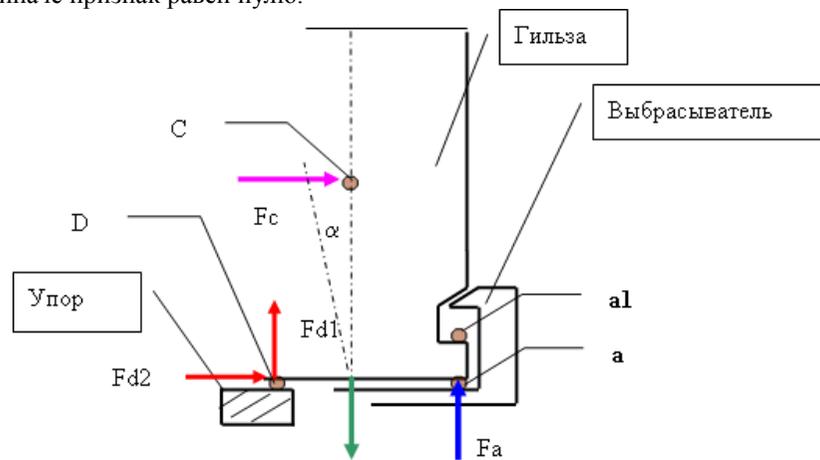


Рис. 3. Схема действия сил

Взаимодействие гильзы и выбрасывателя обеспечивается приложением сил (1) в точке контакта деталей.

Изменение угловых координат осевой линии гильзы вычислялось по следующим формулам (направляющие косинусы):

$$\cos \alpha = \Delta x / R; \cos \beta = \Delta y / R; \cos \gamma = \Delta z / R; R = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} . \quad (2)$$

Моделирование движения гильзы можно разделить на три этапа:

- движение гильзы в патроннике (движение до удара об упор);
- взаимодействие гильзы с выбрасывателем и упором (момент удара гильзы об упор);
- отражение гильзы и вылет в боковое отверстие.

В соответствии с технологией модельно-ориентированного проектирования [4] сложных технических систем предлагается при создании модели движения гильзы использовать принцип унификации. В рамках проведения инженерного анализа в среде MatLab данный принцип будет заключаться в следующем: имитационная модель, разрабатываемая для исследуемой механической системы, создается из унифицированных блоков пользовательской библиотеки Simulink. Таких библиотек может быть несколько. Каждая из них создается для решения определенного класса задач исследования динамики и содержит модули, реализующие взаимодействие между элементами механической системы. Разработанные библиотеки размещаются на общедоступном сервере и могут использоваться для создания имитационных моделей других образцов (аналогов) стрелкового вооружения со схожей механикой

действия.

На примере исследования механизма действия отражения гильзы пистолета-пулемёта ПП-2000 в соответствии с основными этапами движения гильзы создана имитационная модель. Она получена путём трансляции 3D-модели исследуемого механизма (рисунок 4) с последующим добавлением в модель унифицированных блоков из разработанной пользовательской библиотеки Simulink/MyMechanics (рисунок 5).

Блоки библиотеки имитируют прямолинейное движение гильзы в патроннике, взаимодействие её с другими деталями, удар гильзы об упор и вылет в боковое отверстие, а также визуализируют результаты моделирования в виде графиков перемещения и скоростей гильзы и других деталей.

Пользовательская библиотека содержит четыре блока (модуля):

*Module CMASS stabilization.* Модуль обеспечивает движение тела с поперечными колебаниями по осям Y и Z. Применяется для стабилизации гильзы при движении в патроннике.

*Module linear force.* Модуль обеспечивает действие силы на тело вдоль указанной оси. Применяется для задания силы действия пороховых газов на гильзу.

*Module perf elastic impact.* Модуль реализует упругий нецентральный удар движущегося тела о неподвижное тело. Применяется для имитации удара гильзы об упор.

*Module weldOn.* Модуль обеспечивает жёсткое соединение двух тел и их разъединение при наступлении определённого условия в процессе моделирования. Реализует соединение гильзы и выбрасывателя.

Данная библиотека элементов применима для исследования такой же схемы отражения гильзы и в других образцах СПВ.

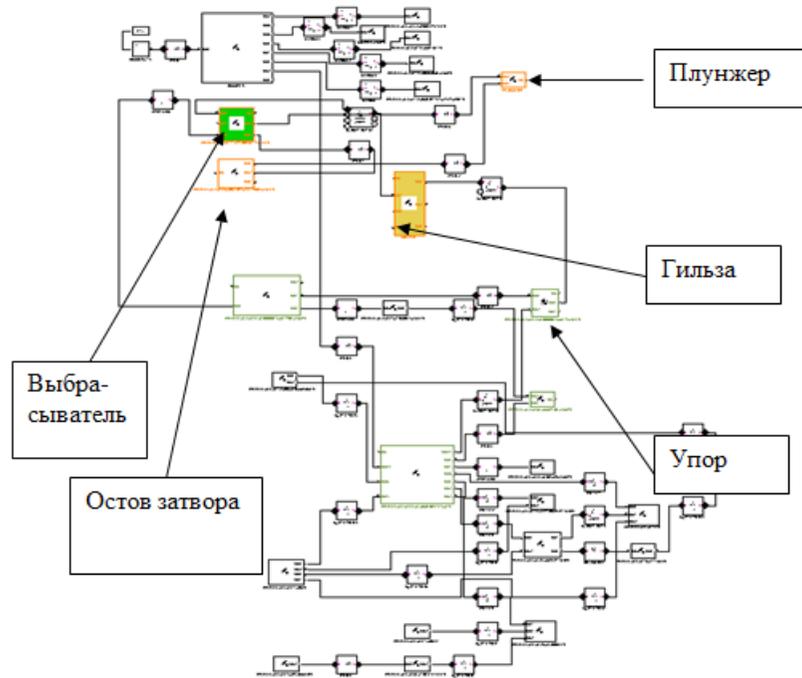


Рис. 4. Модель MatLab, полученная из 3D-модели SolidWorks

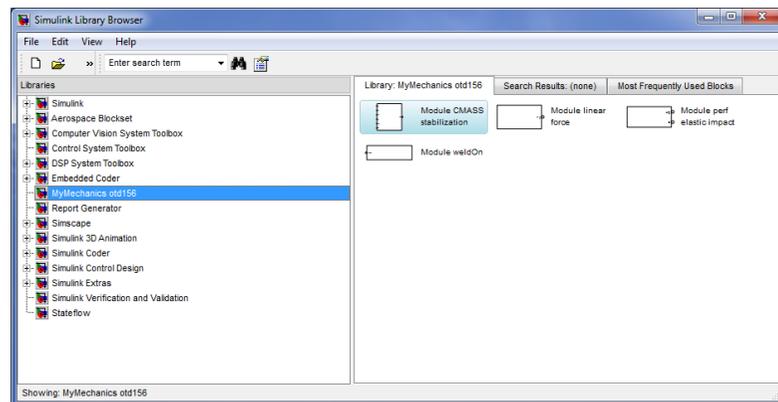


Рис. 5. Пользовательский раздел библиотеки Simulink/MyMechanics

Полученная имитационная модель (рисунок 6) позволяет моделировать:

- движение гильзы в стволе до удара (гильза в зацеплении с выбрасывателем, плунжером и остовом затвора с заданной степенью свободы – поступательное движение вдоль ствола) за счёт воспроизведения воздействия пороховых газов на гильзу;
- удар гильзы об упор с воспроизведением всех действующих сил и моментов при их взаимодействии;
- свободное движение гильзы в пространстве после удара за счет отключения силы, реализующей зацепление гильзы с выбрасывателем, плунжером и остовом затвора;
- визуализировать результаты моделирования (координаты, силы и моменты) при помощи виртуальных осциллографов.

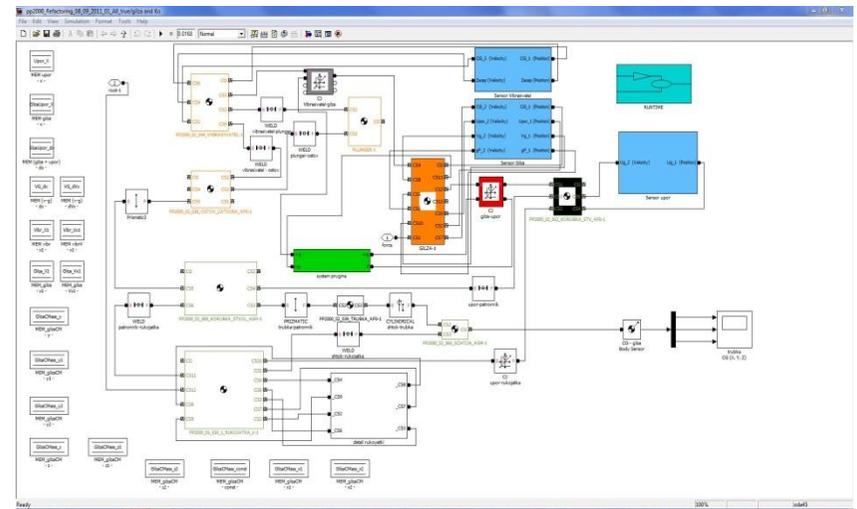
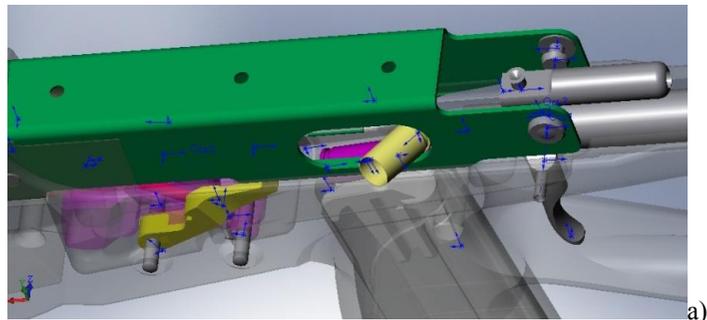


Рис. 6. Имитационная модель исследуемой механической системы в среде MatLab

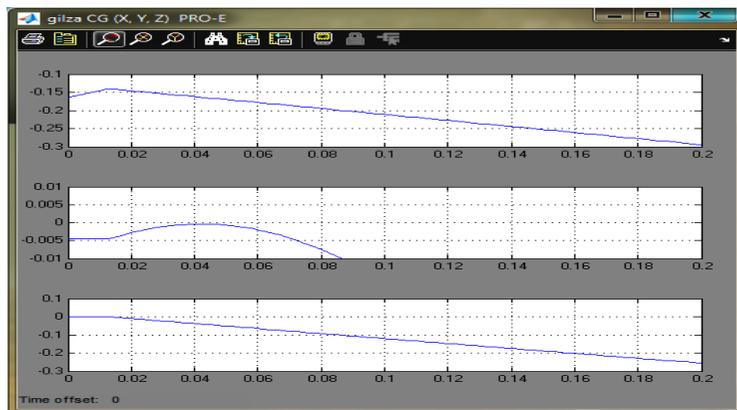
На рисунке 7 приведены результаты моделирования вылета гильзы. В момент, когда гильза ударяется об упор, ее продолжает тянуть назад выбрасыватель и создаёт крутящий момент для гильзы. Гильза меняет траекторию и вылетает в боковое отверстие.



а)



б)



в)

Рис. 7. Моделирование вылета гильзы: а - 3D-модель CAD системы; б - 3D-модель в среде Matlab; в - линейные координаты гильзы в среде MatLab

Использование предложенного подхода позволит сократить время создания имитационных моделей для исследования динамики механических систем и таким образом снизит затраты на отработку образцов СПВ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Алямовский А.А.* SolidWorks / COSMOSWorks 2006 / 2007. Инженерный анализ методом конечных элементов. – М: ДМК, 2007. – 764с.
2. *Лазарев Ю.* Моделирование процессов и систем в MATLAB: Пакеты Signal Processing Tools, Control Toolbox и Simulink с библиотеками Aerospace, SimPowerSystems, SimMechanics: Учебное пособие. – СПб.: Питер, 2005. – 512 с.
3. *Понятский В.М., Колесников Г.И., Федорищева В.Г.* Исследование ударных нагрузок конструкторских проектов САПР SolidWorks в среде имитационного моделирования Simulink пакета MATLAB // Труды VIII международной конференции «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта» CAD/CAM/PDM – 2008. 21 – 23 октября 2008 г. – М.: – ИПУ. – 2008.
4. *Дьяконов В.П.* MATLAB R2006/2007/2008 + Simulink 5/6/7. Основы применения. – 2-е изд., перераб. и доп. – М: СОЛОН-ПРЕСС, 2008. -800 с: ил.
5. *Давыдов Э.Н., Понятский В.М., Кислинский И.В., Осадчий А.В., Федорищева В.Г.* Исследование в среде Matlab динамики вылета гильзы по 3D-модели исходного механизма // Труды X Всероссийской научно-технической конференции. – Тула. ТулГУ, 2011.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВЫХ ГАЗОВЫХ НЕДОРАСШИРЕННЫХ СТРУЙ В ПАКЕТЕ OpenFOAM С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБЛАЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

*А.В. САВИН<sup>1</sup>, П.Г. СМЕРНОВ<sup>2</sup>, С.В. СТРИЖАК<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>ЗАО «Концерн «Струйные технологии», Санкт-Петербург

E-mail: [savin@jettechnologies.ru](mailto:savin@jettechnologies.ru), [petr.smirnov@jettechnologies.ru](mailto:petr.smirnov@jettechnologies.ru)

<sup>2</sup>БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург

<sup>3</sup>МТГУ им. Баумана, Москва

Сверхзвуковые газовые струи – это один из интереснейших объектов для численных экспериментов. Исследования таких струй сохраняют большое прикладное значение [1]. Кроме того, в последнее время появился интерес фундаментального и теоретического характера к ряду необычных явлений, имеющих место в таких струях [2, 3].

В последнее время появились новые возможности, связанные с развитием программных инструментов с открытым кодом (Salome-OpenFOAM-Paraview [4]) и облачных технологий параллельных высокопроизводительных вычислений (программа «Университетский кластер» [5]). Это открывает реальную возможность для небольших творческих групп и для отдельных исследователей вести работы по численному моделированию струй на высшем мировом уровне. Однако

не существует стандартной такого моделирования. В каждом случае необходимо корректно проводить процедуры верификации и валидации.

В настоящей работе приводятся результаты моделирования осесимметричных недорасширенных сверхзвуковых турбулентных струй с числом Маха  $M_a=3$  и степенями нерасчетности  $n=0.3-2.3$  на основе уравнений Рейнольдса в пакете OpenFOAM с использованием двух моделей турбулентности: k-ε и k-ω SST. Проводится сравнение структуры первой «бочки» с экспериментальными данными [6]. Задачи работы: определить, какой из решателей OpenFOAM оптимален для моделирования нерасчетных сверхзвуковых струй; найти наиболее корректный способ задания граничных условий; отработать технологию получения стационарного численного решения.

Для расчетов используется геометрия, соответствующая экспериментальной установке ИТПМ СО РАН [6]: из конического сопла с расчетным числом Маха 3.005 и углом полураствора  $15^\circ$  в окружающую среду с давлением 1.008 бар и температурой  $294\text{K}$  истекает воздух с температурой торможения 287K. Расчеты проведены в 2D осесимметричной постановке для трех значений степени нерасчетности: 0.303, 0.784, 2.314 с помощью решателей sonicFoam, rhoCentralFoam и dbnsFoam. Структуры первой бочки сравниваются с экспериментальными данными [6], а также с результатами численного моделирования, полученными с использованием коммерческих кодов.

Основные результаты:

1. Отработана методика моделирования сверхзвуковых струйных течений с использованием стандартных решателей в составе пакета OpenFOAM: конвертация расчетной сетки, задание граничных условий и параметров схем дискретизации, запуск параллельного решения на локальном компьютере и кластере web-лаборатории UniHUB, изменение граничных условий в процессе расчета, получение сходящегося стационарного решения и анализ результатов.

2. Проведено сравнение с экспериментом структур первой бочки струи, полученных в трех решателях OpenFOAM. Дана характеристика особенностей решателей применительно к моделированию сверхзвуковых струй, даны рекомендации по выбору решателя.

3. Проведено сравнение решений, полученных с использованием двух моделей турбулентности: k-ε и k-ω SST. Даны рекомендации по выбору модели турбулентности.

4. Исследована сходимость решения по сетке.

Таким образом, полученные результаты позволяют установить основные положения методики моделирования сверхзвуковых нерасчетных струйных течений в среде OpenFOAM с использованием параллельных облачных вычислений, а также обеспечить валидацию

предлагаемой методики.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сизов А.М. Газодинамика и теплообмен газовых струй в металлургических процессах, М.: Металлургия, 1987 г. , 256 стр.
2. Савин А.В. Соколов Е.И. Фаворский В.С. Шаталов И.В. Влияние разреженности на процесс нестационарного взаимодействия сверхзвуковой недорасширенной струи с перпендикулярной преградой. ПМТФ, 1991, №6
3. Савин А.В., Соколов Е.И. Вычислительное моделирование образования стационарных циркуляционных зон в недорасширенных сверхзвуковых струях, истекающих в затопленное пространство из сопла с центральным телом. Изв. РАН, Механика жидкости и газа (готовится к публикации).
4. [www.salome-platform.org](http://www.salome-platform.org), [openfoam.org](http://openfoam.org), [www.paraview.org](http://www.paraview.org)
5. <http://unihub.ru>
6. V. I. Zapryagaev; A. N. Kudryavtsev; A. V. Lokotko; A. V. Solotchin; A. Hadjadj. An Experimental and Numerical Study of A Supersonic-Jet Shock-Wave Structure //

## ОСОБЕННОСТИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ВЗРЫВНОГО МЕТАНИЯ ГРУППЫ ТЕЛ

**И.М. СМЕРНОВ, И.В. МАРКОВ**

*Открытое Акционерное Общество*

*«Научно-исследовательский инженерный институт»*

*143912, г. Балашиха, Московская обл., Западная промзона,*

*шоссе Энтузиастов, д.6*

*Т. (495) 524-91-57, факс (495) 524-91-26, E-mail: [oaoniii@pochta.ru](mailto:oaoniii@pochta.ru)*

При проектировании боевых частей (БЧ) инженерных боеприпасов (ИБП) часто приходится использовать численное моделирование быстропротекающих процессов, определяющих либо могущество действия изделия, либо его стойкость к (не)штатным воздействиям. Задачи такого рода решаются средствами математического аппарата механики сплошных сред. Чаще всего геометрию изделия упрощают от излишней детализации: пренебрегают несущественными деталями, объединяют объемы деталей, полученные из одинакового материала, если условия их соединения не влияют на рассматриваемый процесс. Во многих классических задачах, таких как кумуляция, расширение оболочек, взаимодействие тел с преградой, можно обойтись методами, решающими проблему в одной единственной постановке (Эйлеровой или Лагранжевой).

Однако при моделировании процесса взрывного метания групп тел (например, блока поражающих элементов в осколочных БЧ

направленного поля поражения) ситуация усложняется. Основное требование к счетному пакету в данном случае представляет собой наличие процесса обмена данными между большим количеством (сотни тел) разнородных сеток в ходе взаимодействия – то есть их совместного решения. Такое взаимодействие должно существовать как между разными Лагранжевыми, так и между Эйлеровой и Лагранжевой сетками. Это необходимо для удачного разделения зон ответственности: в Эйлеровой постановке решается расширение продуктов реакции (большие деформации, завихрения течений), движение оболочек второстепенной значимости; а в Лагранжевой – индивидуальные элементы группы тел, скорости, направления движения и формоизменение которых важно и представляет собой суть цель исследования.

Существующие подходы альтернативные чисто Лагранжеву или чисто Эйлерову (чаще всего бессеточные на основе SPH) не подходят как раз в силу своих неполных возможностей описать индивидуальные тела как независимые объекты.

При выборе размерности задачи необходимо принимать во внимание, что отсутствие прочности на разрыв у группы тел существенно меняет симметрию решения и адекватно процессы могут быть описаны только в трехмерной постановке.

При моделировании взрывного метания в двумерной постановке следует учитывать стесненность деформаций, что приводит к искаженному и чрезмерному формоизменению элементов, отличающемуся от картины, получаемой в трехмерной постановке или в ходе эксперимента.

Подходу с использованием Лагранжевого представления для каждого из индивидуальных тел присущи два основных недостатка, связанных с особенностью поведения сеток, замороженных в среду, – уменьшение шага по времени при существенном искажении сетки и вырождение ячейки (как крайний случай искажения) с последующей остановкой расчета. Определенных успехов можно добиться, применяя для дискретизации элемента смешанный Эйлеро-Лагранжев метод (ALE), в котором по определенному критерию происходит перестройка внутренних ячеек сетки с целью выравнивания их размера и, следовательно, зависящего от него шага по времени в соответствии с соотношением Куранта.

Проблемной является ситуация, в которой элементы могут взаимодействовать не только с соседями, распределенными по поверхности, но и со слоями, лежащими выше или ниже по нормали к укладке. В силу дискретного разбиения объема индивидуального элемента, внешняя поверхность теряет свою гладкость (это актуально в

первую очередь для шарика или цилиндрика), что может привести к некорректному решению контактной задачи при неудачных конфигурациях взаимного расположения индивидуальных элементов.

Дискретность разбиения дает о себе знать и при взаимодействии продуктов реакции, расширяющихся в Эйлеровой сетке, с индивидуальными элементами, описываемыми в Лагранжевой постановке. Итоговое суммирование сил давления по поверхности элемента зависит от взаимного положения совокупности узлов сеток обеих деталей.

Все эти особенности выводят на первый план качество алгоритмов, применяемых при расчете взаимодействия различных сеток. А проверку выбранного метода численного моделирования приходится осуществлять с помощью эксперимента, в ходе которого регистрируется как можно большее количество данных, указывающих о степени соответствия рассчитанного поведения группы тел с реальным.

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕВЕРСА УПРАВЛЯЮЩЕГО УСИЛИЯ ПРИ ВДУВЕ СТРУИ В ПЕРЕРАСШИРЕННОЕ СОПЛО.**

***М.С. ЯКОВЧУК***

*Балтийский государственный технический университет “Военмех”  
им. Д.Ф. Устинова*

*198005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул. д. 1,*

*т. (812) 259-11-21, факс (812)316-24-09,*

*E-mail [mihailyakovchuk@gmail.com](mailto:mihailyakovchuk@gmail.com)*

Инжекционные органы управления вектором тяги, основанные на вдуве газа в сверхзвуковую часть сопла, широко применяются в отечественных односопловых РДТТ [1]. Создаваемые управляющее усилие складывается из двух составляющих: тяги сопла вдува и силы, приложенной к стенкам основного сопла, вследствие перераспределения давления в области взаимодействия потоков.

Для сопел с расчетным режимом течения или с малым перерасширением основного потока условия на срезе сопла не оказывают влияния на общую картину взаимодействия потоков при вдуве вторичной струи в основной сверхзвуковой поток. Физическая картина взаимодействия становится более сложной при наличии определенной степени перерасширения потока в сопле [2].

На основе экспериментальных исследований [3, 4] определено, что эффективно располагать отверстия вдува от среза сопла на расстояниях

примерно в 20–30 % длины сверхзвуковой части. В тоже время, на режимах перерасширения  $n < 0,3$  (реализуемых, например, при подводном старте с работающим двигателем) перед срезом сопла происходит отрыв потока от стенок. Область отрыва потока может располагаться вблизи отверстий вдува. Определенный интерес представляет моделирование следующих случаев: отрыв потока происходит за отверстием вдува, вблизи отверстий вдува, и перед вдуваемой струей. В последних случаях возможно получения отрицательного управляющего усилия, или реверса управляющего усилия.

Исследование данных процессов проводится в рамках вычислительного моделирования, которое основано на решении системы трехмерных стационарных уравнений Навье – Стока, осредненных по Рейнольдсу. Выбор замыкающей модели турбулентности осуществляется по результатам их апробации для данного класса течений на основе сопоставлении результатов натурного [5, 6] и вычислительного экспериментов.

Моделируемая расчетная область включает сверхзвуковую часть сопла с боковым соплом вдува, малый дозвуковой участок основного сопла, и существенно больший (примерно 15 калибров) участок окружающего пространства за срезом сопла.

Среда моделирования – пакет вычислительной гидрогазодинамики на основе явного и явно - неявного решателя на структурированных вычислительных сетках с технологией многосеточного ускорения сходимости Numesa Fine версии 8.9. Вычисление проводится на сетке с 3 уровнями вложенности, общий размер составляет примерно 2 млн. ячеек. Начальное условие для расчета вязкого газа получено из предварительного последовательного расчета невязкого течения на грубых сетках второго и третьего уровней вложенности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Антонов Р.В, Гребенкин В.И.и др. Органы управления вектором тяги твердотопливных ракет: расчет, конструктивные особенности, эксперимент /. Москва-Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2006. 552 с.
2. Краснов Н. Ф. Кошечкой В.Н. Калугин В.Т. Аэродинамика отрывных течений: М.: Высш. шк., 1988. - 351 с. 1988 г.
3. Виноградов Б.С., Шайхутдинов З.Г. “Тяговые характеристики систем УВТ со вдувом химически нейтральных газов”. Авиационная техника 1977 г.
4. Виноградов Б.С., Шайхутдинов З.Г. «Методические особенности экспериментальных исследований по изучению эффективности органов управления для создания управляющих усилий летательных аппаратов»
5. F.W. Spaid, E.E. Zucoski “A Study of the Interaction of Gaseous Jets from Transverse Slots with Supersonic External Flows” AIAA Journal Vol. 6, No 2, 1968
6. Inoyue, T. “Experiments on Rocket Thrust Vector Control by Hotgas Injection”, Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 3, No. 4, 1966, pp. 737-739.

Фундаментальные основы баллистического проектирования  
2012

Секция 11

Безопасность, экологичность,  
технологии производства и утилизации



## **МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КОМПЛЕКСНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАГРУЖАЕМЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ВЫСТРЕЛОВ**

***Н.П. АГЕЕВ, Е.В. ЗАТЕРУХА***

*Балтийский государственный технический университет  
198005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул. д.1,  
(812)251-84-57, e-mail [bgtu\\_e4@mail.ru](mailto:bgtu_e4@mail.ru)*

Надежное функционирование металлических элементов выстрелов возможно лишь в том случае, если их материалы обладают требуемыми по условиям эксплуатации механическими свойствами.

Следовательно, для технологического обеспечения эксплуатационных свойств прогнозирование характеристик механических свойств на различных стадиях технологических процессов изготовления деталей является весьма важной задачей и требует создания достоверных математических моделей процессов формирования этих свойств с учетом влияния основных конструктивно-технологических параметров изготавливаемых деталей, способов изготовления и режимов обработки.

Для изготовления металлических элементов выстрелов типа гильз, пульных оболочек и др. применяют комплексные технологические процессы, основанные на применении различных методов обработки (процессов холодной обработки давлением, термообработки, химической обработки, механической обработки и др.).

Типовая структура применяемого процесса предполагает выделение этапов, технологических циклов, операций и переходов [1]. За этап принимается законченная часть технологического процесса по получению заготовок или ее конструктивных элементов характерной формы определенным методом и способом обработки. За технологический цикл принимается совокупность двух последовательно выполняемых технологических операций: штамповочной и термической. За переход принимается законченная часть штамповочной операции, например, вытяжка через одну или несколько матриц.

На этом основании модель комплексного технологического процесса формирования механических свойств должна иметь аналогичную иерархическую структуру, состоящую из нескольких уровней.

Целесообразно выделить четыре уровня: первый, низший уровень – переход, второй – операция, третий – технологический цикл и четвертый – уровень технологического процесса.

При разработке математических моделей принимаем следующие постулируемые положения:

1. Комплексный, по структуре линейно – циклический технологический процесс изготовления детали есть закономерная, управляемая, последовательная смена разнородных физических явлений, вызванных реализацией в процессе взаимодействия обработанной заготовки и технологической среды двух основных форм технологического движения: деформационной в процессах штамповки и термической в процессах термообработки.

Тогда в соответствии с законом сохранения энергии, изменение внутренней энергии  $dU$  будет представлено в следующем виде:

$$dU = \sum_{i=1}^2 dQ_i = dA_{y\partial} - dQ_T, \quad (1)$$

где  $dQ_i$  - обобщенная удельная работа;  $dA_{y\partial} = \sigma_i(\varepsilon_i)d\varepsilon_i$  - удельная механическая работа пластической деформации;  $dQ_T = T(dS_T - dS_\partial)$  - составляющая термической энергии.

2. Накопление количественных изменений обобщенной работы приводит к определенным качественным и количественным изменениям структуры и свойств обрабатываемого материала, вызывающим его переход через предельные (необратимые) состояния. Энергетическое условие перехода:

$$\begin{aligned} Q_{i\Sigma} &\geq Q_k; \\ Q_{i\Sigma} &= \sum_{j=1}^{N_{з.ц.}} (A_{y\partial} - Q_T)_j, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $N_{з.ц.}$  – количество завершённых циклов.

3. Основными физико-механическими характеристиками технологического процесса являются удельная работа  $A_{уд}$ , интенсивность  $\varepsilon_i$  и степень деформации  $e_i$ , интенсивность напряженного состояния  $\sigma_i$ , коэффициенты использования ресурса пластичности  $\omega_i$ , относительный модуль пластичности  $E_{\sigma_i}$ , а также характеристики механических свойств  $(\sigma_{0,2}, \sigma_B, \varepsilon_{ip}, \varepsilon_{iy})$

4. Каждая из характеристик технологического процесса и изготавливаемого изделия на любой стадии процесса определяется как сумма систематической  $C_{TjD}(x, y, z)$  и случайной  $C_{Tjs}$  составляющих:

$$C_{Tj}(x, y, z) = C_{TjD}(x, y, z) + C_{Tjs}(x, y, z). \quad (3)$$

5. В пределах технологического и "жизненного" циклов изделия в целом проявляется технологическое наследование свойств металла изделия.

На уровнях штамповочных перехода и операции основным эффектом процессов является деформационное упрочнение металла и соответствующее изменение его механических свойств.

Основными технологическими факторами, влияющими на формирование механических свойств на уровнях переходов и операций являются: вид процесса и схема НДС, величина накопленной эффективной деформации, условия деформации (температура, скорость процесса, условия монотонности процесса и др.). При применении процессов холодной штамповки наиболее существенно влияет накопленная эффективная степень деформации.

$$e_{i\sigma}^j = \sum_{m=i}^{n_{on}} \sum_{k=1}^{n_n} \sum_{l=1}^{n_{cm}} e_i^j, \quad (4)$$

где  $k, i, m$  – количество стадий процесса, переходов, операций.

Интенсивность скорости деформации  $\varepsilon_i$  в процессах холодной деформации влияет несущественно.

На уровне завершенных технологических циклов накопленная эффективная деформация определяется с учетом разупрочняющего влияния термической обработки

$$e_{i\sigma}^j = \sum_{i=1}^N e_{ii}^j \prod (1 - k_{Ti}^j)^{\frac{1}{1+n}}, \quad (5)$$

где  $N = N_{zu} + N_{nu}$ ;  $k_{Ti}$  - коэффициент эффективности термообработки, определяемый при постановке активного планируемого эксперимента;  $n$  - характеристика упрочняемости материала при пластической деформации.

При этом на уровнях операций и технологических циклов модели формирования механических свойств характеризуются зависимостями

$$M_i^j = f(e_{i\sigma}^j),$$

где  $M_i^j$  - характеристика механических свойств в расчетном сечении  $j$ .

На уровне ТП учитывается влияние всех реализованных завершенных и незавершенных технологических циклов.

Обобщенная модель формирования механических свойств при реализации в технологическом процессе, смешанных циклов обработки (упрочняющих и разупрочняющих) может быть представлена в следующем виде:

$$Mn = \sum_{i=1}^N M_i^t - (N_p - 1)M_0 - \sum_{i=1}^{N_y} M_i^o$$

где  $N = N_p + N_y$  - общее количество циклов обработки, в том числе упрочняющие ( $N_y$ ) и разупрочняющие ( $N_p$ );  $M_i^t = M_i^t(e_{i\Sigma}, t_i, \tau_i)$  - многофакторная цикловая модель, учитывающая накопленную степень деформации, режим термообработки;  $M_i^o = M_i^o(e_{i\Sigma})$  - однофакторная цикловая модель, учитывающая влияние только степени деформации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев Н.П., Данилин Г.А. Огородников В.П. Технология производства патронов стрелкового оружия. Ч.1. Технологические основы проектирования патронов: учебник/Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2005. 352 с.

## НАНЕСЕНИЕ ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ МЕТОДОМ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ЛИТЬЯ

**Е.А. АНТОНОВА**

ФГУП «Научно исследовательский институт  
полимерных материалов»

614113, Пермь, Чистопольская ул. д.16,  
т(342)282-77-83, факс(342)283-68-87, E-mail: niipm@pi.ccl.ru

Большинство изготавливаемых зарядов из баллистического твёрдого топлива частично покрываются теплостойкими полимерными материалами. Бронирование поверхностей зарядов необходимо с целью обеспечения постоянства скорости горения и требуемого закона газообразования при горении заряда в составе ракетного двигателя твёрдого топлива.

В статье предложено нанесение теплостойкого полимерного материала на основе олигоэфиракрилата методом центробежного литья, который заключается в заполнении формы составом под действием центробежной силы. Также представлено описание метода бронирования и перечня технологических операций, приведены зависимости технологических параметров: скорости вращения центрифуги и объёмный расход бронирующей массы

В работе показано, что предложенный метод обеспечивает адгезионную прочность скрепления бронирующего покрытия с поверхностью шашки, мало изменяющуюся по длине заряда. А так же, в связи с улучшением заполняемости форм бронирующим составом под действием центробежных сил, повышает плотность бронирующего покрытия вследствие устранения усадочных пор, раковин и воздушных включений.

## СОЗДАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ТОПЛИВНОГО МАТЕРИАЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСТАРЕВШИХ БАЛЛИСТИТНЫХ ПОРОХОВ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

**И.В. БЕЛОВ**

ФГУП «Научно-исследовательский институт полимерных материалов»,  
614113, г. Пермь, ул. Чистопольская, 16,  
т. (342) 250-11-88, факс (342) 283-68-87, E-mail: [niipm@pi.ccl.ru](mailto:niipm@pi.ccl.ru)

В сегодняшнем мире очевидной стала необходимость кардинальной смены отношения ко всем видам сырья и ресурсов, внедрения энерго- и ресурсосберегающих технологий. В условиях возрастания топливно-энергетического дефицита, увеличения стоимости сырья и материалов различные промышленные отходы необходимо рассматривать с точки зрения их максимального использования.

Рядом отраслевых институтов, предприятиями промышленности и Министерством обороны РФ были проведены довольно широкие исследования по различным вариантам утилизации боеприпасов и их составляющих – порохов и твёрдых ракетных топлив (ТРТ). В результате, к настоящему времени накоплен определённый опыт практических работ по демонтажу и раснаряжению боеприпасов, переработке утилизируемых материалов в гражданскую продукцию.

Однако результаты проведённых исследований ещё предстоит внедрить в широкую практику, чтобы утилизация боеприпасов не сводилась главным образом к «добыче» лома цветных металлов. Подобная так называемая «частичная утилизация», влечёт за собой скопление на территориях арсеналов, баз и складов большого количества некондиционных боеприпасов, представляющих потенциальную опасность. Имеющаяся практика уничтожения боеприпасов и их элементов подрывом, сжиганием на открытых площадках, захоронением в земле или затоплением в прибрежной зоне морей приводит к безвозвратным потерям ценных материалов и нанесению значительного экологического ущерба территориям, прибрежной зоне морей, воздушному бассейну.

Значимым источником энергонасыщенных конденсированных материалов являются безвозвратные технологические отходы, смётки производств баллистических порохов и ТРТ действующих предприятий спецхимии. На пороховых заводах в специально отведённых местах периодически производится сжигание таких отходов. В результате этого, с одной стороны имеется негативное воздействие на окружающую среду,

а с другой – нерациональное уничтожение ценных энергетических материалов.

Таким образом, проблема разработки единых методов и технологий по использованию баллистических твёрдых ракетных топлив (БРТ) и порохов из устаревших боеприпасов, подлежащих утилизации, отходов, смёток текущего производства пороховых заводов, на сегодняшний день актуальна и требует своего практического разрешения.

В условиях истощения запасов природных ресурсов и возрастания топливно-энергетического дефицита разнообразные промышленные отходы, устаревшие баллистические пороха и БРТ могут явиться источником энергии и стать основой нового искусственного твёрдого топлива для бытового, коммунального и промышленного применения. Это может иметь важное народнохозяйственное значение, поскольку будут комплексно решаться проблемы безопасности, экологии и энергетики.

Основополагающими принципами при создании таких искусственных топливных материалов являются минимальные затраты на производство и транспортировку, достижение высоких теплотехнических и эксплуатационных характеристик при обеспечении удобства использования, безопасность процесса изготовления и применения. Баллистические пороха и БРТ, обладая небольшим, по сравнению с классическими видами промышленных и бытовых твёрдых топлив, запасом энергии (3,4 – 6,3 МДж/кг) имеют ряд ценных свойств, выделяющих их из ряда горючих материалов [1]:

- достаточно низкая температура воспламенения ( $T_{всп}=170-180^{\circ}\text{C}$ );
- высокая температура горения;
- при взаимодействии с необходимым количеством воздуха запас химической энергии баллистических порохов реализуется со значительным увеличением (до 11 МДж/кг).

Процесс их горения относится к самоускоряющимся автокаталитическим реакциям, поэтому в составе топливных композиций баллистический порох необходимо использовать в качестве добавки улучшающей воспламенение или добавки инициирующей горение (ДИГ).

В качестве ДИГ твёрдого котельного топлива (ТКТ) возможно использование «чистых» пороховых баллистических составов, т.е. не содержащих соединений тяжёлых металлов и других экологически потенциально опасных компонентов.

Для получения искусственного топливного материала с высокими теплотехническими характеристиками совместно с баллистическим порохом необходимо применение высококалорийного горючего. В качестве которого предлагается использовать отходы производства (по фракционному составу) активного древесного дробленого угля,

выпускаемого промышленностью в соответствии с ГОСТ 6217-74 [2]. Ценный высокоэнергетический материал, содержащий в своём составе значительное количество углерода, в связи с отсутствием технологий по его дальнейшей переработке, не находит применения, периодически уничтожается методом захоронения.

Отсевы активного древесного дробленого угля характеризуются неудовлетворительной воспламеняемостью, температура воспламенения составляет  $\sim 700$  °С [3]. Это обусловлено особенностями химического строения этого материала и связано с отсутствием в его составе летучих веществ. Брутто-формула активного древесного угля –  $C_{32}H_{2,3}O_{0,2}$ [4].

Неудовлетворительную воспламеняемость рассматриваемого горючего предлагается компенсировать определённым количеством баллиститного пороха. Такое применение ряда баллиститных порохов и ТРТ, подлежащих утилизации, представляется наиболее рациональным, так как позволяет с наименьшими затратами использовать их высокоэнергетические свойства.

Для прогнозирования характеристик горения ТКТ с ДИГ по «Программе для расчёта термодинамических функций» были определены необходимые характеристики – температура горения, теплота сгорания, расход воздуха, состав продуктов горения. Расчёты выполнены для ряда рецептур баллиститных порохов. Показано, что температура горения и теплота сгорания ТКТ с ДИГ фактически не зависят от марки баллиститного пороха. Температура горения с увеличением содержания пороха в составе ТКТ незначительно растёт, теплота сгорания – уменьшается.

В ходе работы, с использованием подобранного связующего, изготовлены образцы ТКТ с различным содержанием измельчённого баллиститного пороха. Проведены исследования чувствительности к механическим воздействиям, гигроскопичности, сделан дифференциально-термографический анализ, определены низшая теплота сгорания, физико-механические характеристики и зольность.

Показана реальная возможность создания высококалорийного искусственного ТКТ с ДИГ из компонентов, которые в настоящее время не находят своего использования и подвергаются уничтожению.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Жегров Е.Ф. Пороха артиллерийские баллиститные // Энергетические конденсированные системы. Краткий энциклопедический словарь. – Под ред. акад. Б.П. Жукова. – М.: Янус-К, 1999. – С. 404-406.

2. ГОСТ 6217-74. Уголь активный древесный дроблёный. Технические условия. – Взамен ГОСТ 6217-52; введ. 1974 – 05 – 20. М.: Изд-во стандартов, 1984. – 8с.

3. Белов И.В., Ибрагимов Н.Г. Некоторые аспекты использования баллиститных порохов и твёрдых ракетных топлив, подлежащих утилизации //

Вестник Казанского технологического университета. 2011. №21. С 174-179.

4. Новый справочник химика и технолога. Сырьё и продукты промышленности органических и неорганических веществ. Ч. 1. – С.-Пб.: АНО НПО «Мир и Семья», АНО НПО «Профессионал», 2002. – 988 с.

## **ВЫЖИГАНИЕ ВЗРЫВЧАТОГО НАПОЛНЕНИЯ Артиллерийских снарядов**

**\* А.В. ВАГИН, В.А. КАРЕЛИН, В.Ю. МЕЛЕШКО,  
Ю.А. КРАСНОБАЕВ, И.С. КОЧЕЛАЕВСКАЯ**

*Военная академия РВСН имени Петра Великого,  
109074, Москва, Китайгородский пр., д.9, E-mail [vladmelta@rambler.ru](mailto:vladmelta@rambler.ru)  
\*ФКП «НИИ «Геодезия», 141292, Московская область, г.Красноармейск,  
пр. Испытателей, д. 14, E-mail [info@niigeo.ru](mailto:info@niigeo.ru)*

Выжигание разрывных зарядов прессованных ВВ из артиллерийских снарядов может стать экологически безопасным и энергосберегающим процессом при использовании технологий обработки материалов в псевдооживленном слое. Эти современные и развивающиеся технологии позволяют осуществлять интенсивное взаимодействие зернистой рабочей среды с обрабатываемым материалом, аккумулировать выделяющееся тепло в накопителях и распределять во времени расходование накопленного тепла для электрогенераторов и тепловых сетей.

Такой установки выжигания могут быть операции загрузки снарядов и выгрузки процесс может быть заложен в основу работы установки выжигания взрывчатого снаряжения из артиллерийских снарядов широкого диапазона калибров. Основными ограничениями производительности пустых корпусов.

Принцип осуществления выжигания заключается в том, что внутрь вертикально установленного корпуса (рис.1) через открытую вниз горловину подают горячую среду из взвешенных в газе твердых частиц, температура которой выше температуры воспламенения взрывчатого снаряжения. Горловина снаряда и следующая за ней полость снаряда являются, по сути, инерционной ловушкой для твердой фазы в пылегазовом потоке или колпачковым отражателем фонтана в аппарате с фонтанирующим псевдооживленным слоем и вертикальной пневмотранспортной трубой [1,2]. Газовая фаза тормозится в плоскости горловины и твердая фаза по инерции продолжает движение внутрь полости. В момент выхода из трубки пневмотранспорта твердые частицы обладают скоростью

$$U_p = U/\varepsilon - U_t,$$

где  $U$  – приведенная скорость газовой фазы в трубке пневмотранспорта;  $\varepsilon$  - порозность потока в трубке;  $U_t$  – скорость витания частиц заданной формы, массы и размера.

Величина  $\varepsilon$  для течений в режиме пневмотранспорта на выходе из трубки близка к 1. Свободное движение частиц с количеством движения  $m_p U_p$  вертикально вверх тормозится силой веса частицы и аэродинамическим сопротивлением:

$$m_p U_p - (C_y \rho_g U_p^2 S/2 + m_p g)t = 0,$$

где  $\rho_g$  – плотность газа на пути частицы;  $C_y$  – коэффициент аэродинамического сопротивления частицы;  $S$  – максимальная площадь поперечного сечения частицы;  $m_p$  – масса частицы.

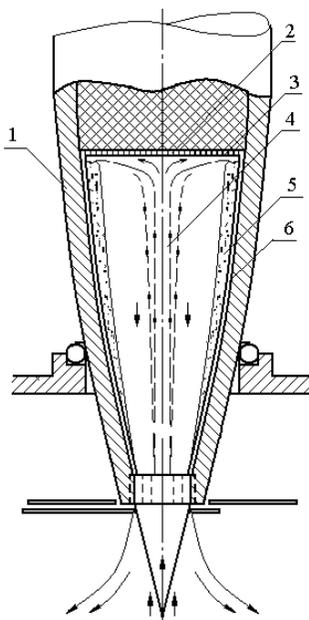


Рис.1. Схема взаимодействия двухфазной струи с зарядом ВВ в корпусе боеприпаса:

- 1- корпус снаряда; 2 – поверхность горения; 3- взрывчатое снаряжение;
- 4- центральный газовый поток с проникающими вверх к поверхности горения частицами твердой фазы; 5 – смешанный кольцевой поток с разреженной твердой фазой; 6- пристеночный слой частиц твердой фазы

Воздействие нагретых твердых частиц на поверхность горения и к-фазу ВВ будет вызывать ускорение горения и стабилизировать температуру газа в полости снаряда. Давлением образующихся продуктов

горения твердые частицы отгаливаются от поверхности и образуют пристеночный кольцевой слой, опускающийся по стенке полости до выхода через горловину в виде кольцевой пелены. На выходе из горловины частицы твердой фазы вместе с продуктами горения подхватываются круговым воздушным потоком, продукты неполного сгорания дожигаются кислородом воздуха, в результате чего частицы твердой фазы, прошедшие через полость снаряда, вместе с частицами твердой фазы экрана образуют общий нагретый нисходящий поток. В этом потоке происходит выравнивание температур твердой и газовой фаз и затем сепарация фаз.

Скорости горения ВВ при атмосферном давлении находятся на уровне 1 мм/с. Температура поверхности горения  $T_s$  гексогена экспериментально определена на уровне 320-312°C, а плотность тока массы с поверхности получена  $m=0,08-0,07$  г/см<sup>2</sup>с. При малых давлениях из-за широкой зоны горения имеет место недогорание, вследствие которого реальная температура продуктов горения существенно ниже расчетной.

Дожигание продуктов неполного горения ВВ повышает экологическую чистоту процесса. Оно проводится вне полости снаряда, что исключает возможные забросы давления в полости снаряда при вскрытии возможных трещин заряда.

В качестве примера проведена оценка характеристик и структуры течений при выжигании взрывчатого снаряжения с плотностью 1,6 г/см<sup>3</sup> из снаряда калибра 100 мм. Экспериментально было показано, что энергия, подводимая к поверхности ВВ в течение 3 мс, должна составлять от 0,1 до 0,4 кал/см<sup>2</sup> для обеспечения воспламенения материалов. Для большинства ВВ значения энергии воспламенения лежат в этом же диапазоне [3].

Предлагаемый процесс выжигания позволяет управлять удалением ВВ из снарядов путем изменения температуры и расхода твердой фазы. Дожигание продуктов неполного горения ВВ повышает экологическую чистоту процесса. Оно проводится вне полости снаряда, что исключает возможные забросы давления в полости снаряда при вскрытии возможных дефектов заряда.

Смешение продуктов с 5-8 кратным расходом инертного зернистого материала для нагрева его до 700-800°C позволит также извлечь энергетические ресурсы ВВ для полезного использования путем накопления зернистого материала в аккумуляторе тепла и равномерного распределения во времени для парогенерации и нагрева рабочего тела тепловых сетей. Такое извлечение энергетических ресурсов может быть эффективным при массовом одновременном выжигании снарядов на установках с большим количеством загрузочных мест, общим

аккумулятором тепла и общим парогенератором. Энергия полного сгорания гексогена составляет около 10 МДж/кг. Для обеспечения бесперебойной работы миниТЭЦ, например, мощностью 500 кВт необходимо при общем к.п.д. 0,2 ежедневно сжигать по 128 снарядов/час с массой взрывчатого снаряжения 7 кг в каждом. Для этого потребуется 20 загрузочных мест с производительностью 6,4 снаряда/час на каждом.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Svoboda K., Baxter D., Miccio F.* Simplified Modelling of Circulating Flow of Solids between a Fluidized Bed and a Vertical Pneumatic Transport Tube Reactor Connected by Orifices // Grant European Commission's Research and Development Programme RFCR-CT-2007-00005. 2008.
2. *Kim S.J.* Fluid and Particle Flow Characteristics in a Draft Tube Spouted Bed with Modified Fluid Outlet // Korean Journal of Chemical Engineering, 1990, Vol.7, № 1, pp.74-80.
3. *Bryan G.J., Noonan E.C.* Energy requirement for the ignition of seven solid explosives // Proc.Roy.Soc. London, Ser. A. Mathematical and Physical Sciences. 1958, A29, Vol.246, №1245, pp.167-175.

### МЕТОДЫ УТИЛИЗАЦИИ ФОСФОРСОДЕРЖАЩИХ ДЫМОВЫХ БОЕПРИПАСОВ

**Н.М. ВАТУТИН, И.А. ЕМЕЛЬЯНОВ, А.С. КОЛЕРОВ,  
В.В. КОЛТУНОВ, А.В. КОЧКИН, И.М. СИДОРОВ**

ФКП «Научно-исследовательский институт «Геодезия»,  
141292, Московская обл., г. Красноармейск, пр-т Испытателей, 14  
т. (496) 523-33-61, факс (496) 523-54-99, E-mail: vatutin@niigeo.ru

В настоящее время на арсеналах, базах и складах Минобороны России скопилось огромное количество боеприпасов с истекшим сроком годности либо снятых с вооружения. Для большинства боеприпасов имеются определённые методы утилизации. Однако остается актуальным вопрос утилизации дымовых боеприпасов, снаряженных жёлтым фосфором.

В этой связи ФКП «НИИ «Геодезия» совместно с ОАО «Оборонсервис» в инициативном порядке проводит работы по разработке методов утилизации таких дымовых боеприпасов. Сложность решаемой задачи обусловлена такими специфическими химическими свойствами жёлтого фосфора как способность самопроизвольного воспламенения на воздухе и высокая токсичность как самого фосфора, так и продуктов его горения. Поэтому основным условием при разработке методов утилизации фосфоросодержащих боеприпасов является соблюдение

особых мер предосторожности, обеспечивающих требуемый уровень безопасности. Перед проведением работ потребовалось доскональное изучение, как конструктивных особенностей различных типов боеприпасов, так и физико-химических свойств самого дымообразующего вещества в данном случае — фосфора.

На основании изложенного было предложено три направления исследований методов утилизации дымовых боеприпасов:

1) извлечение жёлтого фосфора с целью его последующего вторичного использования;

2) превращение жёлтого фосфора в красный непосредственно в корпусе боеприпаса с его последующим извлечением и вторичным использованием;

3) извлечение жёлтого фосфора с одновременной его нейтрализацией.

Каждый из предложенных методов обладает своими преимуществами и недостатками, но при этом все три обеспечивают соблюдение специальных мер безопасности.

С точки зрения обеспечения комплексной утилизации боеприпасов наиболее приемлемыми являются первые два, так как позволяют провести 100% утилизацию боеприпаса, а третий является наиболее простым и безопасным, обеспечивающим возврат только лома чёрных и цветных металлов.

Проведённые ФКП «НИИ «Геодезия» теоретические изыскания позволяют перейти к следующему этапу исследований - изготовлению опытной установки для проведения экспериментов с использованием реальных боеприпасов снаряженных жёлтым фосфором.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Чистяков М.Н.* Артиллерия. М., 1953.
2. *Третьяков Г.М.* Боеприпасы артиллерии. М., 1947.
3. *Будников М.А., Левкович А.А., Быстров И.В. И др.* Взрывчатые вещества и пороха. М., 1955.
4. *Везер В.-Дж.* Фосфор и его соединения. Пер. с англ., М., 1962.
5. *Реми Г.* Курс неорганической химии. Пер. с нем., т.1, М., 1963.
6. *Некрасов Б.В.* Основы общей химии. Т.1, М., 1973.
7. ГОСТ 8986-82 Фосфор жёлтый технический. Технические условия. М., 1998.
8. ГОСТ 8655-75 Фосфор красный технический. Технические условия. М., 1999.
9. Правила безопасности для производств фосфора и его неорганических соединений. ПБ 09-597-03, М., 2003.

**СПОСОБ УЛУЧШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ  
УТИЛИЗАЦИИ ОСТАТКОВ КОМПОНЕНТОВ  
РАКЕТНОГО ТОПЛИВА В ОТДЕЛИВШИХСЯ  
СТУПЕНЯХ**

***М.В. ВЕДЕРНИКОВ, А.В. КАЗИМИРОВ, М.А. ФРОЛЕНКО,  
Д.Г. БЕЛЯНИН, С.Ю. ПИРОГОВ***

*Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского  
197082, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13,  
т. (812) 230-28-15, факс (812) 237-12-49*

В настоящее время из многообразия экологических характеристик ракет-носителей (РН), отражающих пагубное воздействие РН на окружающую среду, выделяют те, которые отражают экологическое воздействие в местах падения отделившихся ступеней (ОС) – это масса выброса компонентов ракетного топлива (КРТ) и площадь эллипса рассеивания точек падения ОС РН.

Представленный способ улучшения данных экологических характеристик основан на использовании энергии остатков КРТ, которые всегда остаются в баках ОС РН после ее отделения от субракеты. Суть способа заключается в дожигании остатков КРТ в специальном устройстве, находящемся на борту ОС РН – бортовом утилизаторе (БУ) и испускании продуктов сгорания из реактивных сопел, расположенных в конструкционных плоскостях ОС РН и направленных перпендикулярно продольной оси ОС РН. Сила, создаваемая БУ, используется для совершения ОС РН корректирующего маневра, позволяющего приземлить ее в намеченном заранее месте и значительно сократить площадь эллипса рассеивания точек падения ОС РН, а дожигание КРТ позволяет снизить массы вредных выбросов КРТ в местах падения ОС РН.

БУ начинает работать в момент спуска ОС РН при ее стабилизации тяжелым двигательным отсеком вперед, то есть, когда остатки КРТ приливают к заборным устройствам баков и под остаточным давлением наддува подаются в камеру сгорания БУ.

Для расчета параметров управляемого таким образом спуска ОС РН, разработана комплексная математическая модель, включающая в себя совокупность взаимосвязанных частных математических моделей, представленных в виде баллистического, аэродинамического, прочностного и газодинамического блоков, отличающаяся учетом влияния корректирующей силы, создаваемой при сжигании остатков КРТ

в БУ.

Традиционный подход при моделировании спуска ОС РН заключается в использовании только баллистического, аэродинамического и прочностного блоков.

Баллистический блок представляет собой математическую модель, описывающую движение центра масс ОС РН в гравитационном поле Земли с учетом влияния атмосферы.

Аэродинамический блок описывает изменение аэродинамического качества ОС РН при случайном изменении угла атаки на этапе ее баллистического спуска.

Прочностной блок представляет собой модель нагружения корпуса ОС РН на этапе спуска при действии внешних сил и тепловых нагрузок. Такая модель позволяет рассчитать спуск ОС РН по баллистической траектории, а в случае разрушения ОС РН – траектории ее обломков и мест их падения.

Для моделирования управляемого спуска ОС РН известные модели необходимо дополнить отдельной математической моделью, описывающей создание управляющего воздействия. В этом случае управляющее воздействие определит угол атаки ОС РН и соответствующее ему аэродинамическое качество. Это повлияет на параметры спуска ОС РН, моделируемые в баллистическом блоке. Прочностной блок, в свою очередь, позволит ввести ограничения по управляющему воздействию, препятствующие разрушению корпуса ОС РН. Поскольку управляющее воздействие создается за счет сжигания остатков КРТ в БУ и последующего истечения продуктов сгорания из рулевых сопел, математическая модель, описывающая эти процессы, представлена в виде газодинамического блока.

На базе этой комплексной математической модели управляемого спуска, создана методика коррекции траектории спуска ОС РН, учитывающая воздействие корректирующей силы, создаваемой при сжигании остатков КРТ в БУ, а также дополнительные ограничения, связанные с возможностью разрушения ОС РН позволяющая рассчитать параметры управляемого спуска и значения вышеуказанных экологических характеристик.

Для реализации данной методики и проведения расчетов траекторий спуска конкретной ОС РН, разработана пневмогидравлическая схема работы БУ на базе штатной РН «Космос».

## ЭКОЛОГИЧНОСТЬ БУРОВОГО ШЛАМА И ЕГО УТИЛИЗАЦИЯ

**С.С. ЗИНИНА**

*Балтийский государственный технический университет*

*198005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул. д. 1,*

*Т. (812) 259-11-21, факс (812) 316-24-09, E-mail [paradis28@mail.ru](mailto:paradis28@mail.ru)*

По характеру разрушения горных пород различают механические и немеханические способы бурения.

Механические способы бурения:

- вращательные (ротаторное, турбинное, реактивно-турбинное, с использованием электробура и винтовых забойных двигателей) - горная порода разрушается в результате вращения прижатого к забою породоразрушающего инструмента (бурового долота);
- ударные
- ударно-поворотное - удары по забою производятся периодически поворачиваемым буровым инструментом;
- ударно-вращательное - удары наносятся по непрерывно вращающемуся буровому инструменту;
- вращательно-ударное - буровой инструмент находится под большой осевой нагрузкой в постоянном контакте с забоем скважины и разрушает горную породу в результате вращения и периодически наносимых по инструменту ударов.

Немеханические способы бурения (разрушение горной породы происходит без непосредственного контакта ее с инструментом):

- термические (огнеструйное, плазменное, лазерное)
- взрывные
- электрические (электроимпульсное, электрогидравлическое, электромагнитное)
- ультразвуковое и т.д.

Источники загрязнения при механическом бурении скважин условно можно разделить на постоянные и временные. К первым относятся фильтрация и утечки жидких отходов бурения из шламовых амбаров. Ко второй группе принадлежат источники временного действия - поглощение бурового раствора при бурении; выбросы пластового флюида на дневную поверхность; нарушение герметичности зацементированного заколонного пространства, приводящее к межпластовым перетокам и заколонным проявлениям; затопление территории буровой вследствие паводка в период весеннего половодья или интенсивного таяния снегов и разлив при этом содержимого шламовых амбаров.

Наибольшую опасность для объектов природной среды

представляют производственно-технологические отходы механического бурения, которые накапливаются и хранятся непосредственно на территории буровой. В своем составе они содержат широкий спектр загрязнителей минеральной и органической природы, представленных материалами и химическими реагентами, используемыми для приготовления и обработки буровых растворов.

В России практически все отходы, связанные с механическим бурением, складываются на полигонах и в шламовых амбарах, что, однако, не освобождает компании от необходимости их утилизации. Весьма обычной является практика сливания жидких продуктов бурения в землю и захоронения твердых продуктов на арендованных землях. Шламовые амбары и котлованы предназначены для хранения в них бурового и тампонажного растворов, буровых сточных вод и шлама, продуктов испытания скважин, материалов для приготовления и химической обработки буровых и тампонажных растворов, хозяйственно-бытовых сточных вод и твердых бытовых отходов, а также ливневых сточных вод.

Использование котлованов и амбаров для размещения и хранения шлама, бурового раствора и других материалов является небезопасным в экологическом отношении способом хранения. На практике обычным является использование неподготовленных, открытых котлованов, что ведет к просачиванию потенциально токсичных веществ в землю и загрязнению окружающей среды (ОС). Специально оборудованные котлованы могут быть причиной загрязнения среды при повреждении и переполнении хранилищ. Закрытые амбары, применяемые для хранения буровых отходов, являются более надежными. Они имеют крышку, которая изолирует шлам от ОС. Однако данная система не является герметичной, и газообразные продукты могут попадать в атмосферу. Кроме того, система не имеет вторичной защиты, подвержена коррозии, что может приводить к загрязнению окружающей среды.

#### Утилизация.

Буровой шлам следует использовать в качестве добавок для производства строительных материалов, учитывая соответствие состава шлама составу сырья для строительных материалов. Например, при соответствии состава шлама требованиям ГОСТ 9759-83 использовать его в качестве добавки при производстве керамзитного гравия, при соответствии ГОСТ 22263-76 использовать в качестве заполнителя бетонов и строительных материалов. При наличии разрешения Государственного комитета Российской Федерации (РФ) по гидрометеорологии и контролю природной среды, а также по согласованию с Министерством рыбного хозяйства РФ разрешается сбрасывать буровой шлам в море после обезвреживания электротермическим методом и с учетом перечня веществ, вредных для здоровья людей или для живых ресурсов моря, сброс которых

запрещается, и норм предельно-допустимой концентрации этих веществ в сбрасываемых смесях. Выдача разрешений на сброс оформляется в соответствии с "Правилами выдачи разрешений на сброс в целях захоронения в море отходов и других материалов, регистрации их характеристик и количества, определения места, времени и метода сброса". Избыточный буровой раствор (нормальный и утяжеленный следует вывозить в герметичных емкостях, снабженных насосом, крановыми судами на соседние буровые платформы или центральные базы для хранения, обработки и повторного использования. При отсутствии возможности повторного использования, утяжеленный буровой раствор следует регенерировать с целью выделения утяжелителя. Остатки после регенерации подлежат захоронению на береговых шламоотвалах или подземному захоронению в соответствии с геологическими и гидрохимическими условиями строительства скважин на конкретных месторождениях.

Что же говоря о немеханических способах, то с экологической точки зрения тут все гораздо лучше. При термическом бурении забой скважин очищается от выбуренной породы газообразным рабочим агентом. А соответственно мы не наносим никакого негативного воздействия на ОС. В настоящее время перспективным является бурение с помощью парогазогенератора. Термическое (огневое) бурение основано на прожигании породы высокотемпературной газовой струей, выходящей со сверхзвуковой скоростью из сопла огнеструйной горелки. Для получения высокотемпературной газовой струи используют распыленный керосин и газообразный кислород (иногда воздух).

Таким образом можно сделать вывод о том, что в последние годы промышленными предприятиями в производство внедряются различные технологические решения, направленные на утилизацию отходов механического бурения. Однако унифицированного способа переработки буровых шламов с целью обезвреживания и утилизации не существует. Предприятия часто сбрасывают отходы бурения в неположенных местах, что является губительным для ОС. В будущем необходим переход с механических на немеханические способы бурения с целью сохранения экологичности ОС. К тому же термический метод выгоден не только с экологической точки зрения, но и с экономической.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Жуховицкий С.Ю. Промывочные жидкости в бурении. Москва.: „Недра” 1976.
2. Волков А.С., Долгов Б.П. Вращательное бурение разведочных скважин. Москва.: „Недра” 1988.
3. „Технология и техника разведочного бурения”. Москва.: Недр” 1983.
4. Паус К.Ф. Буровые промывочные жидкости. Москва.: „Недра” 1967.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ СЛАНЦЕВ ПРИ ИХ НАГРЕВЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

**А.Г. КНЯЗЕВА<sup>1</sup>, А.Л. МАСЛОВ<sup>1</sup>,  
В.В. ЛОПАТИН<sup>2</sup>, С.М. МАРТЕМЬЯНОВ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения  
Сибирского отделения Российской академии наук  
634021, г. Томск, просп. Академический, 2/4

Т. (3822)491-881, ф.(3822)492-576, E-mail: [masloaleksey@rambler.ru](mailto:masloaleksey@rambler.ru)

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

Т. (3822) 563-470, ф.(3822) 563-865, E-mail: [sergmartemyanov@mail.ru](mailto:sergmartemyanov@mail.ru)

В последнее время в ряде стран растет интерес к возможности промышленного использования летучих веществ, образующихся при термическом разложении горючих сланцев – широко распространенных полезных ископаемых. Методы термической переработки можно разделить на поверхностные (наземные) и подземные. Один из способов подземной переработки основан на использовании высокочастотного электромагнитного поля. При наложении переменного электрического поля в диэлектриках выделяется тепло, связанное с их поляризацией, и джоулево тепло, обусловленное током проводимости. Выделяющееся удельная мощность пропорциональна напряженности  $E$  и частоте  $\Gamma$  электрического поля, а также диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  и тангенсу угла потерь  $tg(\delta)$  диэлектрика.

Целью данной работы является построение математической модели термического разложения сланцев при нагреве переменным электромагнитным полем и ее исследование для оценки условий нагрева и начала разложения.

Сам нагрев осуществляется с помощью двух электродов, расстояние между которыми много больше их радиусов  $R_0$ . Потери тепла в окружающие слои вещества учитываются путем введения эффективного коэффициента теплоотдачи.

Модель включает в себя уравнения теплопроводности и химического превращения. Суммарный источник тепла учитывает выделение тепла из-за протекания электрического тока и тепловой эффект химической реакции в сланце. Учитывалась возможность изменения электрических свойств сланца при химическом превращении. Было осуществлено исследование влияния различного расположения электродов, выделены критерии, которые могут быть полезны при экспериментальных исследованиях.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТУШЕНИЯ ВОДОЙ СТРУИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

**М.А. КОРЕПАНОВ, А.А. ШАКЛЕИН**

*Институт Механики УрО РАН*

*426067, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34*

*т. (3412)508200, факс (3412)507959, E-mail [ipm@udman.ru](mailto:ipm@udman.ru)*

При проведении испытаний ракетных двигателей важной составляющей является уменьшение негативного воздействия на окружающую среду, а также снижение мощности излучения, по которому вероятный противник может оценить характеристики испытуемого двигателя.

Одним из подходов, позволяющих решить описанные задачи, является впрыск воды в струю продуктов сгорания работы двигательной установки. Тем самым обеспечивается резкое снижение температуры продуктов сгорания из-за испарения воды, а также поглощение неиспарившимися каплями воды мелкой взвеси конденсированной фазы и хлороводорода.

Для реализации технической стороны задачи по расположению и количеству форсунок, а также расходу воды через них в работе предложена методика численного моделирования процесса впрыска воды в струю продуктов сгорания.

Моделирование сверхзвукового течения производилось на основе системы уравнений Эйлера. Дисперсная фаза рассматривалась в виде сплошной среды (подход Euler-Euler) [1, 2]. Для жидкой фазы записывались уравнения переноса массы, количества движения и энергии. Решение уравнений осуществлялось с помощью многофазного метода крупных частиц [3, 4]. Рассматривалось взаимное влияние жидкой и газообразной фаз (two-way coupling). При взаимодействии фаз учитывалась сила вязкого трения. В уравнении энергии источниками слагаемыми являлись интенсивность теплообмена из-за разницы температур, а также отбираемая от основной фазы энергия в процессе испарения жидкой фазы. Для расчета испарения использовалась модель УТМ [5], скорость испарения записывалась через давление насыщенных паров. Запись выражения для скорости испарения через разницу температур [6] не ограничивает температуру жидкой фазы температурой кипения, позволяя ей в результате теплообмена с газовой фазой возрастать до больших значений. Математическая модель реализована в свободном пакете OpenFOAM.

Отдельное внимание стоит уделить вопросу построения расчетной

сетки. Рациональным вариантом является построение блочно-структурированной сетки из гексаэдров в основной расчетной области и клиньев на оси симметрии. Вследствие слишком плохого качества элементов на оси из-за дробления поверхности впрыска воды на достаточное количество элементов метод крупных частиц «разваливался». Поэтому принято решение вставить в область, окружающую форсунку, тетраэдры, когда основная расчетная область разбивалась на гексаэдры и клинья. Сопряжение тетраэдров и гексаэдров осуществлялось с помощью пирамид.

Тестирование модели проведено на задаче охлаждения струи продуктов сгорания двумя поясами форсунок. Шесть форсунок в кольце охлаждения располагались равномерно, то есть через каждые 60 градусов. Для ускорения расчетов рассчитывалась область в 30 градусов таким образом, чтобы одна из плоскостей симметрии проходила через форсунку. Размеры установки представлены на схеме (рис. 1).

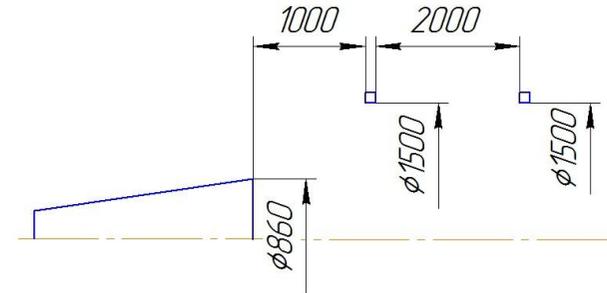


Рис. 1. Схема установки

При решении задачи принят ряд допущений: химическими реакциями в продуктах сгорания пренебрегалось; струя воды уже на выходе из форсунки считалась дисперсной, то есть задавался диаметр капель на граничном условии втекания жидкости; не учитывалась конденсированная фаза, вылетающая из работающего двигателя. Параметры газовой фазы составляли  $k = 1.18$ ,  $R = 300$  Дж/(кг·К),  $\mu = 1e-4$  Па·с,  $\lambda = 1e-2$  Вт/(м·К), а жидкой —  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $c = 4200$  Дж/(кг·К), скрытая теплота испарения  $H = 2.25e6$  Дж/кг. Скорость и температура потока на срезе сопла составляли 2500 м/с и 2400 К соответственно. Расход воды через каждую форсунку первого обруча охлаждения равнялся 30 кг/с, а у второго обруча – 67.5 кг/с.

В результате расчетов получено пространственное распределение в области струи скоростей (рис. 2), температур и энергий обеих фаз, концентрации паров воды, а также изменение диаметра капли при удалении от форсунки и количества капель (рис. 3).



Рис. 2. Распределение скорости газовой фазы

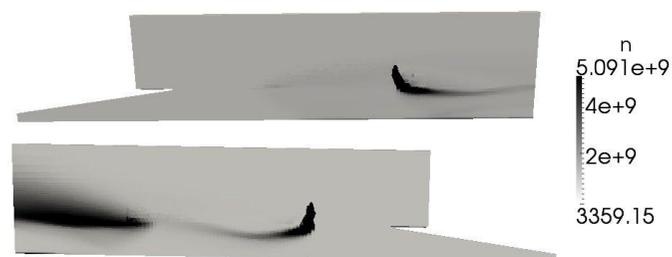


Рис. 3. Количество частиц (капель) жидкой фазы

Представленная методика позволяет определять необходимое количество воды, расположение форсунок и количество поясов охлаждения для снижения температуры струи продуктов сгорания до заданного значения на определенном расстоянии от сопла. Кроме того, методика предсказывает распределение водной фазы (число частиц и диаметр капель) вблизи струи продуктов сгорания, позволяя оценить поглощение хлороводорода и конденсированной фазы каплями воды для предотвращения загрязнения окружающей среды.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Miller R.S., Harstad K., Bellan J. Evaluation of equilibrium and non-equilibrium evaporation models for many-droplet gas-liquid flow simulations // International journal of multiphase flow. 1998. Vol. 24. P. 1025-1055.
2. Wilms J. Evaporation of multicomponent droplets: diss. ... Doctor of Engineering / University of Stuttgart. Stuttgart, 2005. 177 p.
3. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. М.: Наука, 1982. 392 с.
4. Губайдуллин А.А., Ивандаев А.И., Нигматулин Р.И. Модифицированный метод «крупных частиц» для расчета нестационарных волновых процессов в многофазных дисперсных средах // Журнал вычислительной математики и

математической физики. 1977. Т. 17. № 7. С. 1531-1544.

5. *Gudmundsson R.L.* On stability of solutions to the two-fluid models for dispersed two-phase flow. Licentiate's thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2002. 29 p.

6. *Сполдинг Д.Б.* Горение и массообмен. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.

## УТИЛИЗАЦИЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ РДТТ В РЕАКТОРАХ С КИПЯЩИМ СЛОЕМ

**Ю.А. КРАСНОБАЕВ, А.В. ВАГИН\*, В.Ю. МЕЛЕШКО,  
Г.Я. ПАВЛОВЕЦ, В.О. ГРЕК, В.С. КОЧЕЛАЕВСКАЯ**

*Военная академия РВСН имени Петра Великого,*

*109074, Москва, Китайгородский пр., д.9, E-mail [vladmelve@rambler.ru](mailto:vladmelve@rambler.ru)*

*\*ФКП «НИИ «Геодезия», 141292, Московская область, г. Красноармейск,  
пр. Испытателей, д. 14, E-mail [info@niigeo.ru](mailto:info@niigeo.ru)*

Малогабаритные РДТТ получили достаточно широкое распространение в ракетной технике в качестве вспомогательных и управляющих средств обеспечения полета по заданным траекториям летательных аппаратов, средств ориентации и коррекции орбит космических летательных аппаратов, тяговых двигателей неуправляемых снарядов и т.п.

Поскольку времена работы таких РДТТ преимущественно короткие (1-5с), то применение водяного охлаждения и мокрой скрубберной нейтрализации вряд ли является целесообразным из-за высоких подготовительных и заключительных расходов воды и средств нейтрализации. Обработка этих расходов перед сбросом в канализацию приведет к дополнительным затратам и росту стоимости сжиганий. Кроме того, водяное охлаждение и мокрая скрубберная нейтрализация повышают стоимость установки и сложность ее эксплуатации. Поэтому основное внимание было уделено сухим способам охлаждения продуктов сгорания и нейтрализации агрессивных веществ.

Из-за широкой номенклатуры РДТТ представляется целесообразной разработка сначала базовой конструкции установки на сжигание зарядов с определенным расходом, например, 1 кг/с (тяга около 2000 Н) и модульным наращиванием пропускной способности для сжигания зарядов с большим расходом.

Непрерывный принцип действия установки предусматривает обработку продуктов сгорания (ПС) после выхода их из сверхзвукового сопла РДТТ или истечения из камеры сгорания РДТТ в бессопловом варианте сжигания. Задачей обработки продуктов сгорания является

снижение их энергосодержания до уровня, который будет приемлемым для работы системы сухой очистки. Возможными вариантами могут быть активный и пассивный способы обработки.

При активном способе обработки ПС подвергаются принудительной очистке от конденсированных продуктов сгорания, отбору тепловой энергии и механической энергии с помощью таких технических средств как инерционное отделение частиц, поглощение энергии газового потока при эжекции дискретных элементов с последующей их инерционной сепарацией. Активный способ обработки ПС позволит уменьшить размеры и массу установки за счет сокращения длины газохода от РДТТ до поглощательного аппарата.

Поглощение энергии газового потока при эжекции в поток дискретных элементов основано на уравнении энергии эжектора [4]

$$E = \frac{1}{2} \frac{(G_1 w_1 + G_2 w_2)^2}{(G_1 + G_2)} = \frac{1}{2} (G_1 + G_2) w_3^2,$$

где  $G_1$ ,  $G_2$ - расходы газовой струи и дискретных элементов, соответственно;

$w_1$ ,  $w_2$  - начальные скорости газовой струи и дискретных элементов, соответственно;

$w_3$  - конечная скорость газовой струи и дискретных элементов.

Начальная скорость дискретных элементов может быть равной нулю. При сепарации дискретных элементов ( $G_2 = 0$ ) в конце участка их разгона конечная энергия газовой струи останется равной

$$E_{\text{лк}} = \frac{1}{2} G_1 w_3^2.$$

Длина участка разгона дискретных элементов определяется свойствами этих элементов, в том числе формой, плотностью и размерами. Одновременно с нестационарным разгоном дискретные элементы подвергаются нестационарному интенсивному нагреву и отбирают тепло от газа.

Конструктивное исполнение активного газохода может быть различным, как по типу подвижной фильтрующей насадки, так и по схемам движения дискретных элементов в газоходе.

Сепарированные дискретные элементы подвергаются охлаждению и очистке от налипшего оксида алюминия, например в шаровой мельнице, и используются для следующих сжиганий РДТТ. За счет такого циклического использования дискретных элементов сокращается время между сжиганиями РДТТ и повышается производительность установки.

Сухие поглощательные аппараты рассчитываются на применение сухих высокотемпературных сорбентов, характеризующихся высокой сорбционной емкостью, например, 1,35 кг/кг HCl при 923K [6]. Составы

таких сорбентов имеют в своей основе соединения кальция и магния. По результатам экспериментов газовая нагрузка на неподвижную поглотительную насадку из смеси гранул сорбента и пассивных гранул 1:1 по массе может быть около 60 мл газа/мин·г насадки при содержании HCl от 1 до 10% масс.

Если сжиганию подвергаются заряды с массами порядка 5 кг, ПС которых содержат, например, 0,14 кг HCl/кг топлива, то общее количество выделившегося хлорида водорода составит 0,7кг, для поглощения которого потребуется  $0,7 \cdot 1,35 = 0,945$  кг сорбента. По условиям опытной нагрузки на сорбирующую насадку для обработки  $1 \text{ м}^3/\text{с}$  газа потребуется масса сорбентной смеси 1000 кг. При плотности материала около  $3000 \text{ кг}/\text{м}^3$  и порозности насадки  $\varepsilon=0,35$  объем ее составит менее  $1 \text{ м}^3$ .

Задавая приведенной скоростью газа по входному сечению насадки, например,  $0,2 \text{ м}/\text{с}$ , получаем площадь поперечного сечения поглотительного аппарата  $5 \text{ м}^2$  или квадрат  $2,24 \times 2,24 \text{ м}$  ( $D=2,5 \text{ м}$ ) и высотой  $0,2 \text{ м}$ . Для сравнения, накопительная емкость при начальной температуре поступающего газа около  $3000 \text{ К}$  при сжигании 5 кг топлива должна иметь объем по меньшей мере  $25 \text{ м}^3$ . Именуемой массы сорбента в сорбентной смеси в объеме поглотительного аппарата будет достаточно для поглощения хлорида водорода из ПС более 500 таких РДТТ. Очищаемый газ поступает в поглотительный аппарат сверху, чтобы исключить выброс сорбента при ударном натекании газа при пуске.

Возможны другие варианты применения сухих сорбентов на основе кальция для очистки газов от HCl, в том числе при более низких температурах ( $326 \text{ К}$ ) с использованием циклонов в качестве поглотительных аппаратов [7]. Были разработаны варианты применения высокотемпературных сорбентов на основе кальция при утилизации крупногабаритных РДТТ в беспопловой компоновке [8]. Оставшиеся после удаления HCl ПС либо дожигают с воздухом, либо используют для термостатирования поглотительного аппарата в условиях непрерывной работы установки. Запас горючего газа, необходимый для запуска установки после длительного перерыва, может храниться в газовом ресивере, наполняемом с помощью компрессора.

Основные агрегаты установки могут быть размещены в двух 40-футовых морских контейнерах. Считается возможной как вертикальное расположение РДТТ соплом вверх, так и горизонтальное. При вертикальном расположении РДТТ активный газоход может выступать над крышей контейнера, как показано на рис.1. В этом случае в активном газоходу дискретные элементы могут двигаться под действием поступающего снизу газа в режиме подвижного насадочного слоя или в режиме витания.

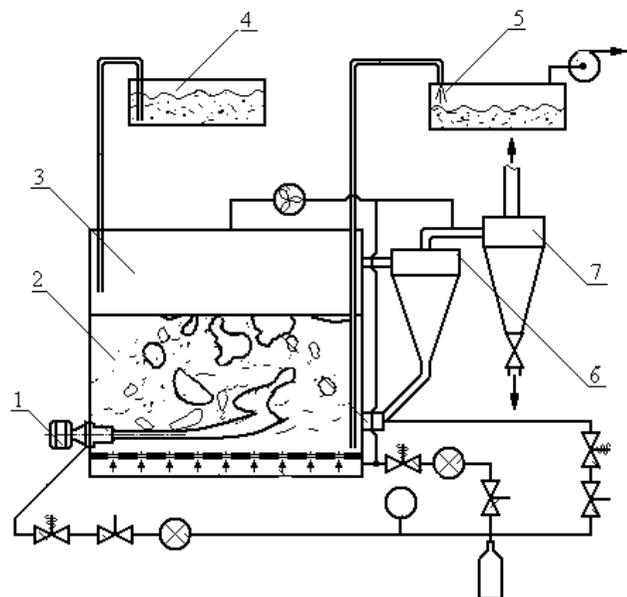


Рис.1. Принципиальная схема установки утилизации МРДТТ:  
1 - РДТТ; 2 – псевдооживленный слой; 3 – сепарационное пространство; 4,5 -  
котейнеры; 6,7 – контейнеры

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бурдюгов С.И., Саков Ю.Л., Вайсман Я.И. и др. (RU) Установка для испытаний ракетных двигателей твердого топлива // RU 2267025. 2005.
2. Tadmor O., Hirsch E. Destruction of rocket engines. US 5458071. 1995.
3. Wilson K., Erickson E.D., Schadow K.C. Apparatus for After-Burning Fuel-Rich Rocket Exhaust Products. US 6101957. 2000.
4. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. Наука. М. 1976.
6. Tanahashi N., Kojima Y., Matsuda H. Dry Sorption of HCl in Pyrolysis Gas from PVC Waste with Coal Fly Ash-Based Sorbent // Proc. 9-th International Conference on Environmental Science and Technology, Greece, 2005.
7. Chibante V., Fonseca A., Salcedo R. Dry Scrubbing of Acid Gases in Recirculating Cyclones // Journal of Hazardous Materials, 2007, Vol.144, pp.682-686.
8. Мелешко В.Ю., Карелин В.А., Атаманюк В.М. и др. Способ утилизации зарядов твердого ракетного топлива // RU 2285202. 2006.

## РЕГЕНЕРАЦИЯ ТЕПЛА ПРИ СЖИГАНИИ РДТТ

**Ю.А. КРАСНОБАЕВ, В.А. КАРЕЛИН, В.Ю. МЕЛЕШКО,  
Г.З. ЗАКАРИЕВ, И.С. КОЧЕЛАЕВСКАЯ**

*Военная академия РВСН имени Петра Великого,  
109074, Москва, Китайгородский пр., д.9, Е –mail [vladmelve@rambler.ru](mailto:vladmelve@rambler.ru)*

Применение регенераторов тепла является важным средством сбережения энергетических ресурсов и должно применяться во всех областях техники, включая утилизационные технологии.

Проблема массовой ликвидации устаревших РДТТ и боеприпасов, снаряженных взрывчатыми веществами (ВВ), с сохранением полезных ресурсов ВВ все еще не решена окончательно.

Представляется целесообразным выжигание энергетических материалов в оригинальных устройствах с регенерацией тепла продуктов сгорания. Сохраненное тепло может быть использовано для любых народно-хозяйственных целей. Поскольку времена выжигания РДТТ достаточно короткие, порядка секунд, а тепловые мощности большие, до 1ГВт, то необходимы новые способы регенерации тепла продуктов сгорания энергетических материалов.

В настоящее время наблюдается повышенное внимание к твердым теплоносителям в виде зернистых сыпучих материалов, которые могут быть использованы в теплоэнергетике и ядерной энергетике с целью использования в процессах горения, восприятия тепла продуктов сгорания рабочими телами парогенерирующих установок, охлаждения теплонапряженных элементов парового цикла отсроченном использовании генерированного тепла и т.п. В отличие от обычных газовых или жидкостных теплоносителей, для переноса тепла не требуются высокие давления и защита от коррозии. Имеется возможность работы при высоких температурах, например, 800 - 900°С, что позволит получать больший к.п.д. энергопреобразования.

Дисперсный материал для работы по извлечению тепла должен иметь следующие характеристики:

- быть сыпучим, не слипающимся при высоких температурах;
- иметь время динамической релаксации частиц  $\tau_p$  и тепловой релаксации частиц  $\tau_t$  менее 1 с;
- обладать износостойкостью и быть пригодным к повторному многократному применению;
- обладать низкой абразивностью;
- иметь высокую теплоемкость;
- не должен слеживаться при хранении;
- быть прочным на удар при падении с высоты 3-5 м на

поверхность слоя частиц;

- быть пригодным для выжигания прилипших примесей;
- иметь малый угол внутреннего трения.

В процессе взаимодействия с продуктами сгорания дисперсный материал может загрязняться продуктами неполного сгорания. Результатом может быть агломерация частиц и потеря возможности псевдооживления. Очистка дисперсного материала может осуществляться в теплообменнике путем выжигания вентиляционным потоком воздуха. Материал при этом должен обладать каталитическими и окисляющими свойствами.

Для осуществления процесса может быть использован способ, реализованный в устройстве, представленном на рис.1.

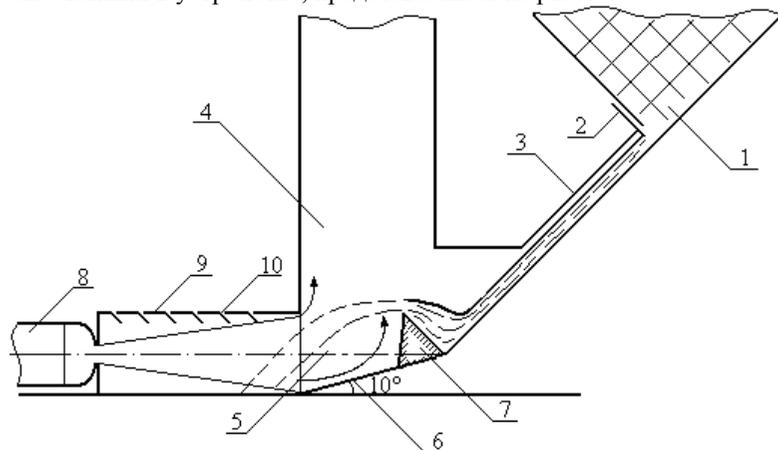


Рис.1. Схема приемного устройства продуктов сгорания:

1 - бункер хранения; 2 - подъемная заслонка; 3 - наклонный желоб; 4 - стояк пневмотранспорта; 5 - камера смешения; 6 - переходный участок; 7 - отбойник-дефлектор; 8 - РДТТ; 9 - диффузорный приемник; 10 - жалюзи

Устройство состоит из бункера хранения, размещенного на опорной конструкции для использования гравитационной силы в качестве основного средства механического воздействия на сыпучий твердый теплоноситель. Бункер хранения снабжен подъемной заслонкой, определяющей высоту слоя сыпучего твердого теплоносителя на пристыкованном к бункеру закрытом наклонном желобе, и стояком пневмотранспорта с камерой смешения в нижней части. Закрытый наклонный желоб заканчивается переходным участком с меньшим углом наклона и расположенным на нем блоке отбойника-дефлектора. Утилизируемый РДТТ пристыковывается к диффузорному приемнику, который снабжен регулируемыми направляющими жалюзийными

пластинами для поступления эжектируемого воздуха. Массовое содержание псевдооживленной твердой фазы для обеспечения температуры 800°С - 900°С в аккумуляторе тепла должно быть около 5 кг/с на 1 кг/с твердого топлива с теплотой полного сгорания 10 МДж/кг. Например, при утилизации РДТТ с расходом твердого топлива 100кг/с в течение 100с необходимо загрузить в бункер не менее 330 м<sup>3</sup> сыпучего твердого теплоносителя при порозности засыпки в бункере  $\epsilon=0,4$ . Эта загрузка будет обеспечивать расход сыпучего твердого теплоносителя 6,29 м<sup>3</sup>·с при порозности потока в желобе  $\epsilon=0,7$  или массовый расход 4687кг/с при плотности сыпучего твердого теплоносителя 2500 кг/м<sup>3</sup>.

Быстрые гравитационные течения возникают в сыпучих твердых материалах, помещенных в желоб с углом наклона  $\phi$  к горизонту более угла внутреннего трения материала. При этом сначала возникает ускоренное течение с последующим переходом к стационарной скорости движения. Стационарная скорость течения зависит от скорости свободного падения частиц материала в атмосфере. Ускорение зависит от толщины слоя. Длина участка ускорения связана с толщиной слоя  $h$  и углом наклона  $\phi$ . При больших углах наклона стационарная скорость достигается в желобах с большей длиной. При толщинах слоя порядка 1см максимальные ускорения составляют до  $0,35g \cdot \sin\phi = 7,5 \text{ м/с}^2$  при  $\phi=50^\circ$  [1].

Преобразование потока сыпучего твердого теплоносителя в наклонном желобе в облако механической взвеси частиц происходит в результате взаимодействия гравитационного течения с установленной на его пути преградой типа отбойника. Результат зависит от режима течения, скорости течения  $u_0$ , высоты преграды  $H$  и толщины слоя  $h$ . В экспериментах со сверхкритическими режимами течения, определяемыми по числу Фруда  $Fr=u_0/(gh\cos\phi)^{1/2}>1$ , наблюдали, что при достижении препятствия поток частиц отрывался от верхней кромки препятствия и образовывал начальную когерентную струю. Угол отрыва  $\beta$  был меньше угла наклона препятствия  $\alpha$  по отношению к поверхности желоба, причем разность углов  $\alpha-\beta$  была более заметна при уменьшении угла  $\alpha$ . Скорость отрыва  $u_1$  определялась из уравнения сохранения энергии потока сыпучего твердого теплоносителя

$$u_1 = k\sqrt{u_0^2 - 2gH \cos\phi},$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий потери энергии при взаимодействии с преградой.

При  $k=1$  потерь энергии при ударе потока о преграду нет. По результатам экспериментов применительно к исследованию противоловинных защитных сооружений, при  $2 < H/h < 3$  получали  $0,5 < k < 0,8$  на сплошных и зубчатых препятствиях [2].

Упрощенно взаимодействие потоков можно рассматривать как проникание высокоскоростной струи в податливую среду типа псевдооживленного слоя. Такие задачи уже исследовались в работах [3,4].

Используемый в предлагаемом способе механизм объемного взаимодействия больших расходов газа и сыпучего твердого теплоносителя позволяет получить однородное по объему смешение материалов в псевдооживленный слой и однородный теплообмен с достижением высокой полноты извлечения тепла из продуктов сгорания РДТТ. Практическое применение регенерации тепла при утилизации сжиганием ракетных двигателей твердого топлива требует решения не только технических, но и организационно-экономических задач, поскольку должны быть приняты во внимание такие вопросы как транспортировка РДТТ к месту расположения станции выжигания, хранение подготовленных к сжиганию РДТТ, периодичность сжиганий, потребность в тепловой и электрической энергии предприятий или местных муниципальных образований и т.п.

Установки с экскавацией сыпучего твердого теплоносителя из придонного слоя могут выполняться как в стационарном так и в мобильном вариантах. При регулярной производительности 1 – 2 изделия в сутки возможно обеспечение электроэнергией и теплом муниципальных образований или, при работе совместно с местной ТЭЦ, сокращение потребления ископаемых энергоносителей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Boerzsoenyi T., Ecke R.E.* Rapid Granular Flows on a Rough Incline: Phase Diagram, Gas Transition, and Effects of Air Drag//Cond. Mat. Soft. 2006, Vol.16, 10 pp.).
2. *Hakonardottir K.M., Hogg A.J., Batey J., Woods A.W.* Flying Avalanches//Geophysical Research Letters, 2003, Vol.30, №23, 2191 (4 pp) - Univ. Bristol – Univ. Cambridge, UK.
3. *Tyler J., Mees P.* Using CFD to Model the Interaction of a Horizontal Feed Jet on Fluidized Bed Hydrodynamics// Second International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, CSIRO, Melbourne, Australia, 6-8 December 1999
4. *Шахова Н.А., Минаев Г.А.* Инженерный метод расчета струи в псевдооживленном слое. ИФЖБ 1970, Т.19, №6, С. 1002--1011.

## ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЖЕСТКИХ СГОРАЕМЫХ КАРТУЗОВ МОДУЛЬНЫХ МЕТАТЕЛЬНЫХ ЗАРЯДОВ ИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СГОРАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ.

**А.Н. КРЕСТОВСКИЙ**

ФГУП «Научно-исследовательский институт полимерных материалов»  
614113, Пермь, ул. Чистопольская, д.16  
т. (342) 283-68-87, факс (342)283-68-87, E-mail [niipm@pi.ccl.ru](mailto:niipm@pi.ccl.ru)

Исследования по созданию модульных метательных зарядов (ММЗ) проводятся как за рубежом, так и в России, однако зачастую при их создании не обеспечивается полный комплекс требований к метательным зарядам. В основном это связано со свойствами разработанных материалов для жестких сгораемых картузов (ЖСК), имеющих высокую скорость горения, сорбционную стойкость к нитроэфирам, входящих в артиллерийский порох, что вызывает изменение характеристик выстрела в процессе хранения.

В целях обеспечения эксплуатационной надежности артиллерийских и минометных зарядов раздельного заряжания необходим новый подход к разработке перспективных материалов для ЖСК, стойких к действию мигрирующих труднолетучих пластификаторов артиллерийских порохов, расширения температурного диапазона эксплуатации (повышения термостойкости) и повышения эксплуатационной прочности.

Разработка материала для ЖСК с требуемым комплексом характеристик, позволяющего создать современные артиллерийские системы модульного заряжания с высокими боевыми и эксплуатационными характеристиками, является актуальной проблемой развития современного отечественного ракетно-артиллерийского комплекса.

К настоящему времени решение задачи проводится путем изготовления ЖСК по технологии основанной на навоилачивании в основном целлюлозного волокна, главным недостатком которой являются высокие экономические и материальные затраты на производство ЖСК.

Целью же данной работы является разработка нового материала для малозатратной, технички и экологически безопасной, с высокой степенью автоматизации технологии, включающей в себя новые конструктивные и технические решения для универсального производства ЖСК любых типоразмеров.

В части разработки ЖСК к настоящему времени выбрано

оптимальное направление создания рецептуры сгораемого материала на основе терморезистивных полиэфиракрилатных олигомеров и промышленной технологии литья под давлением (без использования суспензий). В настоящее время производство ЖСК из терморезистивных пластов в России и за рубежом полностью отсутствуют.

В результате проведенных работ была получена полимерная композиция (ПК), которая выполняет роль связующего всех компонентов сгораемого материала. ПК обладает хорошими адгезионными способностями и представляет собой быстроотверждающуюся композицию на основе олигоэфируретанакрилатного олигомера, эфира метилового метакриловой кислоты и олигоэфиракрилата[1].

Проведена работа в направлении выбора для этого связующего эффективной иницирующей системы термического отверждения, способной активизировать процесс полимеризации в присутствии ингибиторов, содержащихся в энергонасыщенных наполнителях сгорающего материала[2,3,4,5].

Поскольку в производстве более удобным является использование однокомпонентных комплексообразователей, то для сгораемого материала выбран инициатор перекись бензоила. Неотъемлемым компонентом иницирующей системы при этом является ацетилацетонат марганца. Живучесть полученной полимерной композиции составила до 10 часов при комнатной температуре, а время полимеризации материала составило до 6 часов.

Одно из основных требований при создании сгораемого материала – обеспечить его горючесть. Материал картуза должен сгорать за время выстрела полностью и без остатка. Обеспечить это требование возможно лишь при использовании высокоэнергетических наполнителей, в частности нитрата целлюлозы, кристаллических взрывчатых веществ и других подобных им соединений. В качестве наполнителей ПК выбраны нитрат целлюлозы и гексоген, который, обладает высокой энергетикой и имеет низкую чувствительность к механическим воздействиям.

После изготовления образцов сгораемого материала, получены результаты физико-механических испытаний, определения скорости и закона горения. Данные испытаний образцов показывают, что все полученные материалы СГМ обладают удовлетворительными механическими свойствами, которые позволяют обеспечить требуемые эксплуатационные характеристики ЖСК. Благодаря возможности изменения в составе содержание энергонасыщенных компонентов, можно получить материал СГМ с требуемой скоростью горения для выполнения основного требования к ЖСК по полному сгоранию его в камере орудия в процессе выстрела.

На этапе обработки сгораемого материала была определена его

сорбционная стойкость к нитроэфирам, входящих в артиллерийский порох. Определение проведено по разработанной методике в условиях эмитирующих полное выполнение гарантийных сроков хранения ЖСК, до 15 лет (термостатирование материала ЖСК в контакте с артиллерийским порохом при температуре 60 °С в течение 15 суток). Благодаря миграционной стойкости полимерной основы материала, получены результаты которые позволят обеспечить постоянность характеристик выстрела в процессе гарантийного срока хранения модульного метательного заряда.

В части разработки технологии изготовления ЖСК к настоящему времени выбрано оптимальное направление по малозатратной технологии изготовления ЖСК методом литья под давлением. Для отработки технологии были разработаны и изготовлены опытные образцы оборудования и приспособлений, отработаны технологические режимы и получены образцы ЖСК удовлетворительного качества.

Таким образом, переработка сгораемого материала и получение ЖСК к перспективным артиллерийским системам вооружения становится возможна по малозатратной, технической и экологически безопасной, с высокой степенью автоматизации комплексной технологии производства экструзионным способом на основе смесителей непрерывного действия (по принципу производства зарядов из смесового твердого топлива).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов Л.Н., Охрименко Э.Ф., Степанов Е.С. и др. Разработка, исследование и внедрение высокоэффективных унифицированных защитно-крепящих материалов (ЗКС) и бронепокрты, механизированных технологических процессов и оборудования при изготовлении прочноскрепленных и вкладных зарядов из смесовых и баллититных твердых ракетных топлив. Отчет ФГУП «НИИПМ», 1985г.
2. Синицина З.А., Багдасарян Х.С. Ингибирующий эффект и строение ингибиторов. Журнал физической химии, 1958, т. XXXII, вып. 12. – 2663 с.
3. Чалтынян О.А. Вопросы химической кинетики и катализа, Москва, АН СССР, 1955. – 280 с.
4. Долгополк Б.А. Вопросы химической кинетики и катализа, Москва, АН СССР, 1955. – 213 с.
5. Хмельницкий Л.И. Справочник по взрывчатым веществам: Справочное пособие. – М.: Химия, 1962. – 844с.:ил.

## **НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЖАРНОЙ ЗАЩИТЫ ОСОБО ВЗРЫВОПОЖАРООПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПОЖАРОТУШЕНИЯ (БАСП) «ПУРГА»**

***Г.Н. КУПРИН***

*ЗАО НПО «Современные пожарные технологии»  
196641, Санкт - Петербург, п. Металлострой, промзона  
«Металлострой» дорога на Металлострой, д.5 литер А  
тел.-факс (812) 464-61-41, 464-61-45 [sopot@sopot.ru](mailto:sopot@sopot.ru)*

В последние годы на складах и базах боеприпасов, а также на объектах по производству и утилизации вооружения и боеприпасов произошло большое количество пожаров и взрывов.

Пожарная защита подобных объектов оказывалась малоэффективной, системы пожаротушения штатные или прибывающие со стороны, не обеспечивали быструю ответную реакцию, что приводило к крупномасштабному развитию пожара на больших площадях.

ЗАО НПО «СОПОТ» является патентовладельцем новейших технологий подавления пожара на штабелях с боеприпасами, в частности с помощью пожарного автомобиля с противоосколочной защитой на шасси танка Т-72, с помощью которого обеспечивается гарантированное тушение пожаров на штабелях открытого хранения.

В развитие данной технологии создана и испытана быстродействующая автоматическая система пожаротушения (БАСП) «Пурга».

Данная система представлена в качестве макетного образца предназначенного для проведения оценочных, огневых, натурных испытаний на объектах с высокой степенью пожаровзрывоопасности.

В основе пожарной защиты таких объектов положено обнаружение загорания с помощью датчиков пламени за время до 0,3с и подачу комбинированных струй огнетушащих пен различной дисперсности и кратности (пен низкой, средней и высокой кратности). При этом пена низкой кратности, обладая повышенной кинетической энергией, высокой плотностью (близкой к плотности воды) и высокой охлаждающей способностью, обеспечивает снижение скорости химической реакции горючего вещества. Пена средней кратности способствует изоляции зоны химической реакции (зоны горения) от кислорода из окружающего пространства, а пена высокой кратности за счет низкой теплопроводности не допускает теплопередачу в окружающее

пространство. Более того, в случае взрывного характера горения она способствует снижению энергии взрыва в несколько десятков раз.

Таким образом, такая технология одновременной подачи огнетушащих пен на объект способствует:

1. Локализации горения в пределах замкнутого пространства (в объеме).
2. Отбору тепла (охлаждению стен, дверей, потолка, др. конструкций).
3. Профилактической обработке объекта после возгорания.

Проведены натурные испытания системы, которые подтвердили, что система реагирует на пламя горящего пороха массой менее 0,1 кг. Время срабатывания от момента появления пламени до подачи огнетушащего вещества в зону горения с интенсивностью не менее 30% от максимального около 1 сек.

Макетный образец БАСП «Пурга» собран на базе 20-тифудового контейнера (рис. 1).



Состав оборудования:

- Многодиапазонные извещатели пламени;
- Извещатель пожарный ручной;
- Прибор приемно-контрольный охранно-пожарный;
- Оповещатели охранно-пожарные свето-звуковые;
- Щиты автоматического управления макетом;
- Переносной пульт дистанционного управления макетом;

Рис. 1. БАСП (общий вид)

- Автоматическая система отвода продуктов сгорания;
- Автоматическая система отвода дренажных вод;
- Быстротворяющиеся клапана запорной арматуры;
- Емкость с пенообразователем;
- Емкость с водой;
- Емкость для дренажных вод;
- Трубопроводная арматура;
- Электронасосная станция;
- Система детонации пиротехнических зарядов;
- Системы видеонаблюдения и регистрации процесса проведения натурных испытаний;
- Электрооборудование имитирующее обстановку помещения производства по изготовлению пиротехнических зарядов.

В качестве объектов тушения пожаров могут быть приняты

помещения и оборудование по хранению, переработке и транспортировке пиротехнических, воспламенительно-замедляющих составов, систем и объектов по утилизации и уничтожению оружия и боеприпасов взрывчатых и химических веществ и другие объекты особо взрывопожароопасных производств.

На рисунках 2 – 5 изображены стадии возникновения и тушения возгорания в замкнутом пространстве.



Рис. 2. Горение пороха



Рис. 3. Срабатывание системы



Рис.4. Полная ликвидация горения.  
Объем заполнен полностью



Рис. 5. Полная ликвидация горения.  
Объем заполнен полностью

**РАЗРАБОТКА БАЛЛИСТИЧЕСКОГО  
СТЕНДА-ИМИТАТОРА КОНЕЧНОСТЕЙ ЧЕЛОВЕКА  
ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТКАНЕВЫХ  
МАЛОСЛОЙНЫХ ПРОТИВООСКОЛОЧНЫХ  
СРЕДСТВ ЗАЩИТЫ ПРИ ИХ НЕПРОБИТИИ  
ПОРАЖАЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**

***С.М. ЛОГАТКИН, И.А. СПИВАК***

*К-043, г. Санкт-Петербург, в/часть 33491*

*Т.(812) 527-80-10 доб.716, факс (812) 527-93-31*

1. История вопроса и проблема исследования:
  - приведен анализ проблемы в методах испытаний тканевых малослойных противоосколочных средств защиты при их непробитии поражающими элементами;
  - сформулированы требования к стенду-имитатору конечностей человека
  
2. Методы экспериментальных исследований:
  - приведены две схемы проведения исследований.
  
3. Разработка структуры стенда-имитатора и обоснование материалов-имитаторов:
  - выделены основные блоки стенда-имитатора;
  - приведен анализ возможности использования различных материалов-имитаторов для использования их в блоках стенда-имитатора;
  - приведены данные сравнительных испытаний материалов-имитаторов;
  - приведено обоснование оптимальных материалов-имитаторов;
  - определены составляющие стенда-имитатора
  
4. Проверка работоспособности стенда:
  - приведены результаты испытаний стенда-имитатора;
  - приведен сравнительный анализ результатов испытаний стенда-имитатора и биологического объекта экранированных тканевыми малослойными противоосколочными средствами защиты.

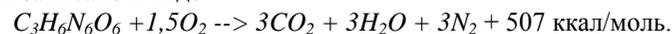
## ПРОЦЕСС СЖИГАНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ В ИНСИНЕРАТОРАХ С КИПЯЩИМ СЛОЕМ

**В.Ю. МЕЛЕШКО, Ю.А. КРАСНОБАЕВ, В.О. ГРЕК,  
В.С. КОЧЕЛАЕВСКАЯ**

*Военная академия РВСН имени Петра Великого,  
109074, Москва, Китайгородский поезд, д.9, тел. (495) 696-31-81,  
E-mail: [vladmelve@rambler.ru](mailto:vladmelve@rambler.ru)*

Утилизация фрагментированных энергетических материалов приобретает значение в связи с развитием технологий вымывания взрывчатых наполнителей из корпусов боеприпасов и отсутствием возможности их использования по прямому назначению. Для этих целей могут быть использованы инсинераторы с кипящим (псевдооживленным) слоем. Основным достоинством инсинераторов с псевдооживленным слоем считается низкий расход энергии. Это делает возможным извлечение избыточного тепла из реактора для различных целей, например, нагрева отдельного отсека реактора с целью термической обработки корпусов боеприпасов среднего калибра в небольших количествах. Инсинераторы с псевдооживленным слоем особо пригодны для уничтожения насыпных масс ВВ и твердых ракетных топлив в виде суспензий, состоящих из энергетических материалов и воды.

Сжигание, например, гексогена с воздухом до конечных продуктов может быть записано в виде



При выходе продуктов горения из реактора с температурой около 1000°C уходит энергия до ~ 30,99 МДж/час без учета энергии, выносимой вместе с зернистым материалом слоя и уходящей в стенки реактора и далее в окружающую среду. Приход энергии ограничен сгоранием гексогена с теплотой горения 9,57 МДж/кг и пропана с теплотой сгорания 50МДж/кг. Тепло также расходуется на испарение воды, поступающей в реактор с суспензией. При максимальном расходе воздуха и пропана расход электроэнергии на подогрев воздуха составлял 21,7МДж/час или 60,54 МДж/кг гексогена (16,81 кВт-ч/кг гексогена). Целью работы являлся поиск путей снижения затрат внешней энергии на операции инсинерации взрывчатых веществ типа гексогена.

По-видимому, подача гексогена или других ВВ в реактор в виде разбавленной водной суспензии не является оптимальным решением, хотя и удовлетворяет требованиям техники безопасности. Для повышения автономности установки часть воды суспензии целесообразно заменить твердым горючим материалом, компенсирующим при сгорании внешние энергетические затраты. Смесь этого твердого горючего материала с ВВ в

виде пасты можно подавать в реактор, причем содержание ВВ должно быть ограниченным проверенными безопасными концентрациями. Твердый горючий материал не должен давать зольных остатков для упрощения эксплуатации установки.

Применительно к инсинерации 15 кг/ч гексогена был проведен оценочный расчет параметров установки с учетом известного опыта конструирования камер сгорания (реакторов) с кипящим слоем.

Уравнение теплового баланса реактора на стационарном режиме принималось в следующем виде

$$m_1 H_1 + m_2 H_2 - m_3 H_3 + m_4 C_p T_0 + m_0 C_p T^* = (m_0 + m_1 + m_2 + m_3 + m_4) C_{pf} T_f$$

где  $m_1, H_1$  - массовый расход и теплота сгорания гексогена;

$m_2, H_2$  - массовый расход и теплота сгорания полиуретана;

$m_3, H_3$  - массовый расход и теплота испарения воды из пасты;

$m_4, C_{p,a}, T_a$  - массовый расход, удельная теплоемкость и температура поступающего в реактор воздуха, в случае подачи нагретого воздуха;

$m_0, C_{p,o}, T^*$  - массовый расход зернистого материала слоя по линии рециркуляции, удельная теплоемкость зернистого материала и температура возвращаемого в реактор зернистого материала после охлаждения и очистки.

Расход воздуха для оценочных расчетов принят  $m_4 = L_0 (m_1 + m_2)$ , где  $L_0 = 12$  - стехиометрический коэффициент для топливной смеси с гексогеном. Для чисто углеводородных жидких горючих обычно принимают  $L_0 = 14,7 - 15$  [1].

Правая часть этого выражения представляет энергонапряженность реактора в МДж/с (МВт), на основании которой определяются основные размеры реактора. Было замечено, что удельная объемная энергоемкость реакторов различной мощности  $E_{y\delta}$  является практически постоянной величиной и может быть использована в проектировании новых реакторов на заданную энергонапряженность (тепловую мощность).

$$E_{y\delta} = \frac{\sum_1^4 m_i H_i}{V} t_{np}, \text{ МДж/м}^3$$

где  $V$  - объем реактора с кипящим слоем;

$t_{np}$  - время пребывания веществ в реакторе.

Оценка значений величины  $E_{y\delta}$  для различных реакторов с кипящим слоем по литературным данным, показывает что в первом приближении можно принять  $E_{y\delta} = 0,565 \text{ МДж/м}^3$  как оптимизированное значение для промышленной установки.

Для рассматриваемого случая с расходом гексогена  $m_1 = 4,17 \text{ г/с}$ , расходом воздуха на сжигание  $m_4 = 12(m_1 + m_2) = 36m_1$ , расходом воды

$m_3 = 7m_1$  и теплотой испарения 44,041 кДж/моль, энергонапряженность от сжигания смеси гексогена с полиуретаном составит  $E_f = 0,179 \text{ МДж/с}$ , что позволяет при  $t_{np} = 1 \text{ с}$  определить объем реактора  $V = 0,32 \text{ м}^3$ .

В первом приближении можно принять  $T^* = T_f$ , т.е. массовый поток рециркуляции возвращается в слой зернистого материала с той же температурой, что была на выходе из слоя.

Если далее принять диаметр реактора 0,35 м, то его высота составит  $H = 3,29 \text{ м}$ . По рекомендациям [2] должно быть выдержано условие  $H \leq 10D$ . Поскольку расход воздуха задан, площадь поперечного сечения реактора  $F = 0,0962 \text{ м}^2$  и приведенная скорость  $U = 1,29 \text{ м/с}$ .

Высота слоя зернистого материала в статическом состоянии из условия  $H_b/D < 1$  [2], составит 0,3 м; в этом случае объем слоя будет  $0,02886 \text{ м}^3$ , а масса слоя при  $\varepsilon_0 = 0,35$  и плотности материала  $2500 \text{ кг/м}^3$  составит 46,9 кг. В рабочем состоянии при  $\varepsilon_f = 0,8$  высота слоя составит

$$H_{bf} = H_b (1 - \varepsilon_0) / (1 - \varepsilon_f) = 0,95 \text{ м}.$$

Нагрев истекающей среды в первом приближении (при условном значении средней удельной теплоемкости компонентов  $C_{pf} = 1,2 \text{ кДж/кг}^\circ\text{С}$ ) и  $T^* = T_f$ , т.е. тепло от сгорания гексогена и полиуретана не расходуется на нагрев циркулирующего зернистого материала, составит

$$T_f = \frac{E_f}{C_{pf} M_f} = \frac{178,91}{1,2 \cdot 0,1918} = 777^\circ\text{С}.$$

В этом приближенном расчете не учитывались тепловые потери в стенки, которые могут быть значительными при недостаточной теплоизоляции.

Проведенный оценочный расчет показывает возможность реализации такого процесса инсинерации гексогена в автономной установке без использования электрического подогрева и с соблюдением требований по взрывобезопасности. Небольшой расход горючего позволяет использовать одноточечную подачу горючего в кипящий слой. Разрабатываемые устройства подачи должны обеспечить распределение смеси горючего материала по слою без перегрева ее в линиях подачи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Стечкин Б.С., Казанджан П.К., Алексеев Л.П. и др. Теория реактивных двигателей. –М., Оборонгиз. 1958. 533 с.
2. Johnsson F. Fluidized Bed Combustion for Clean Energy. Chalmers University of Technology // The 12-th International Conference on Fluidization- New Horizons in Fluidization Engineering. 2007, Article 131.

**СОЗДАНИЕ КОМПЛЕКТА СИСТЕМ И УСТРОЙСТВ,  
ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕГО ВЫСОКОЭФФЕКТИВНУЮ  
ПРОТИВОПОЖАРНУЮ И ПРОТИВОВЗРЫВНУЮ  
ЗАЩИТУ ХРАНИЛИЩ И ПОГРЕБОВ БОЕЗАПАСА  
НОВЫХ КОМПЛЕКСОВ ОРУЖИЯ НК ВМФ**

**А.Г. НИКОРА**

*К-043, г. Санкт-Петербург, в/часть 33491  
Т.(812) 527-80-10 доб.716, факс (812) 527-93-31*

На испытательной базе полигона расположен испытательный комплекс - «Объект-61» – средств ППВЗ погребов НК.

Основные цели огневых натурных испытаний по проверке достаточности и эффективности систем и средств ППВЗ корабельных хранилищ ракетных комплексов:

- проверка эффективности штатных систем и средств ППВЗ погреба при несанкционированном срабатывании двигателя ракеты;
- определение характера и протекания аварийного процесса в погребе при боевом повреждении двигателя ракеты одиночным осколком;
- проверка теплового и силового воздействия газопламенной струи работающего или поврежденного двигателя ракеты на рядом расположенные ракеты, оборудование, погреба, корабельные конструкции;
- определение состава газовой среды внутри погреба после окончания аварийной работы двигателя;
- выработка рекомендаций по использованию ингибиторной и других систем погреба;
- определение возможности дальнейшего повышения эффективности систем и средств ППВЗ;
- накопление экспериментальных данных для создания теории расчетов экспериментальных режимов внутри погребов для корректировки норм и требований к проектированию ППВЗ ЗУРО кораблей ВМФ.

В период 1986-90 г.г. на «Объекте-61» проводились огневые натурные испытания различных систем и средств ППВЗ корабельных погребов.

В настоящее время рассматривается вопрос о возобновлении испытаний средств ППВЗ погребов новых ЗРК современных надводных кораблей с привлечением заинтересованных представителей заказывающих управлений и предприятий промышленности.

В частности, в 2012 году, на основании Заключения Экспертного Совета ВМФ по теме «Состояние работы по разработкам и внедрению систем обеспечения взрывопожаробезопасности на действующих, модернизируемых, проектируемых и перспективных надводных кораблях и подводных лодках Военно-Морского Флота. Анализ соответствия современным требованиям, возможности унификации, выводы и предложения» с техническими заданиями на выполнение натурных испытаний изделия АПЗ-028 в адрес 19 ИП ВМФ обратился Концерн «Моринформсистема-Агат» в лице ОАО «НПФ «Меридиан».

## **ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫЕ ЛЬДООБРАЗУЮЩИЕ КОМПОЗИЦИИ ДЛЯ НОВЫХ ПРОТИВОГРАДОВЫХ РАКЕТ**

**М.С. РЕЗНИКОВ<sup>1</sup>, Н.Е. ТИМОФЕЕВ<sup>2</sup>, И.А. АБДУЛЛИН<sup>2</sup>,  
А.И. СИДОРОВ<sup>1</sup>, А.Ш. МИНГАЗОВ<sup>1</sup>, А.В. ЛУШНОВ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Чебоксарское производственное объединение им. В.И. Чапаева

428006 г. Чебоксары, ул. Социалистическая, 1

т. (8352) 39-62-10, факс (8352)62-22-98 [rti@chtt.ru](mailto:rti@chtt.ru)

<sup>2</sup>Казанский национальный исследовательский технологический университет

420015, г.Казань, ул. К.Маркса, д. 68,

т. (факс) (843) 231-40-82, E-mail [beloborodova@kstu.ru](mailto:beloborodova@kstu.ru)

### Введение

Используемые в практике активных воздействий противорадовые ракеты имеют ряд недостатков:

- 1) отсутствие унитарности снаряжения;
- 2) нестабильность горения пиро-порохового заряда;
- 3) малый коэффициент полезного наполнения (9%);
- 4) малая дальность полета.

Существенно увеличить эффективность противорадовой ракеты (ПР), упростить ее конструкцию возможно при использовании льдообразующего твердого топлива (ЛТТ) – унитарной композиции, выполняющей две функции: 1) источника движения ракеты; 2) генератора активных центров кристаллизации.

Эффективность возгонки льдообразующего реагента (ЛР) с помощью ЛТТ определяется следующими основными характеристиками: 1) температурой продуктов сгорания; 2) составом продуктов; 3) временем нахождения паров реагента при высокой температуре в генераторе; 4) скоростью разбавления и охлаждения паров реагента при истечении

продуктов сгорания из генератора. Из указанного следует, что активность получаемого аэрозоля зависит от свойств ЛТТ и конструктивных особенностей генератора.

Эффективность ЛТ оценивают двумя основными характеристиками: 1) величиной выхода активных центров кристаллизации (АЦК) с 1 г топлива; 2) величиной удельного импульса тяги.

Выход АЦК при горении заряда ЛТТ в маршевом двигателе ПГР должен быть не менее  $1 \cdot 10^{13} \text{ г}^{-1}$  при температуре минус  $10^\circ\text{C}$  и не менее  $5 \cdot 10^{11} \text{ г}^{-1}$  – при температуре минус  $6^\circ\text{C}$ . Значение удельного импульса тяги должно быть не менее 1650 м/с при  $P_k/P_a=20/1$ .

В продуктах сгорания ЛТТ не должно быть веществ, относящихся по опасности к первой группе; содержание менее опасных веществ не должно превышать ПДК химических веществ в окружающей среде.

Исходя из анализа требований к ЛТТ, опыта разработки ТТ и ЛПС, исследовали следующие топливные композиции:

- 1) смесового типа с перхлоратом аммония (НВТС-33М, СНК-33, БКМ-20-3М и др.);
- 2) смесового-баллиститного топлива с нитратом аммония (СБТ-57М);
- 3) баллиститного типа (ВБС, ДГМН);
- 4) на основе крошки конверсионного нитроцеллюлозного пороха.

При разработке рецептур ЛТТ было установлено, что льдообразующая активность топливных композиций существенно зависит от содержания ЛР. Повышение содержания реагента не приводит к пропорциональному увеличению льдообразующей активности. При увеличении содержания йодида серебра до 2% льдообразующая активность значительно увеличивается; при дальнейшем увеличении содержания ЛР льдообразующая активность повышается незначительно.

При неизменном содержании йодида серебра льдообразующая активность существенно зависит от соотношения компонентов. Максимальный выход АЦК достигается в условиях восстановительной среды при коэффициенте избытка окислителя  $\alpha=0,3-0,5$ .

Введение металлического горючего в ЛТТ приводит к увеличению удельного импульса тяги, однако льдообразующая активность при этом уменьшается.

## **ПРИВЕДЕНИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ПО ОТРАБОТКЕ РДТТ К ЭКОЛОГИЧЕСКИМ ТРЕБОВАНИЯМ ПО ОЧИСТКЕ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ**

**М.И. СИДОРОВ, Т.А. ТЕПЛОВА, А.С. КОЛЕРОВ**

*ФКП «Научно-исследовательский институт «Геодезия»,  
141292, Московская обл., г. Красноармейск, пр-т Испытателей, 14  
т. (496) 523-33-61, факс (496) 523-54-99, E-mail: vatutin@niigeo.ru*

На территории ФКП «НИИ «Геодезия» располагаются два горизонтальных и один вертикальный испытательные комплексы, предназначенные для проведения огневых стендовых испытаний всех типов и габаритов ракетных двигателей на твёрдом топливе (РДТТ).

При сгорании смесового твёрдого ракетного топлива (СТРТ) входящего в состав РДТТ образуются и выделяются в атмосферу такие вещества как: водород, пары воды, оксид углерода, азот, хлористый водород, двуокись углерода, цианид водорода, оксид алюминия и др. вещества.

В настоящее время на предприятиях промышленности обычных вооружений, боеприпасов и спецхимии всё большее внимание уделяется обеспечению экологической безопасности проводимых работ. В этой связи обеспечение экологической безопасности наземных огневых стендовых испытаний крупногабаритных РДТТ, а также их утилизации методом прожига является чрезвычайно важной и актуальной народнохозяйственной задачей.

Исходя из необходимости обеспечения экологических требований, на предприятии завершаются работы по созданию экологически чистого испытательного комплекса, обеспечивающего проведение огневых испытаний и утилизацию РДТТ с максимальной массой заряда СТРТ до 30 тонн.

В состав комплекса входят: закрытый горизонтальный стенд, газожидкостной эжектор (ГЖЭ), газоход, сепаратор, коллекторная. газгольдеры и другая вспомогательная аппаратура.

Работа испытательного комплекса основана на том, что при проведении стендовых испытаний производится связыванием образующихся продуктов сгорания и вредных веществ в газожидкостном эжекторе за счёт подачи в него в процессе работы РДТТ нейтрализующего раствора, а также их дожиганием за счёт подачи в ГЖЭ сжатого воздуха. Образующаяся паровоздушная в ГЖЭ паровоздушная смесь по газоходу поступает в сепаратор, где оседает и собирается на дне,

а очищенный газовый поток выбрасывается в атмосферу. Отработанный нейтрализующий раствор собирается и поступает в коллекторную для очистки и повторного использования.

Использование экологически чистого испытательного комплекса позволит обеспечить степень очистки образующихся продуктов сгорания СТРТ по оксиду углерода и оксиду алюминия до 98,5%, по хлористому водороду до 99,3%, а по цианистому водороду и другим легколетучим соединения до 100%.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА УШИРЯЮЩЕЙ ЭКСТРУЗИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ СТАЛЬНЫХ СЕРДЕЧНИКОВ ПУЛЬ**

***В.Г. ТЕРЕЩЕНКО***

*Балтийский государственный технический университет  
198005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул. д. 1  
(812) 251-84-67 E-mail [tereschenko\\_v\\_g@mail.ru](mailto:tereschenko_v_g@mail.ru)*

Повышение прочности стальных сердечников важно для патронов с пулями любого назначения и, в особенности, для пуль бронебойных и повышенной пробиваемости. В связи с этим, в патронном производстве всегда актуальна задача создания технологии, обеспечивающей повышение прочностных свойств поражающего элемента пули – сердечника.

Применяемая технология изготовления стальных сердечников повышенной прочности, в основном, ориентирована на использование метода обработки резанием для формообразования сердечников и метода упрочняющей термообработки (закалки с отпуском) для их упрочнения. Обработка резанием до закалки не позволяет улучшать макро и микроструктуру металла и не только сохраняет все несовершенства исходных заготовок, но и добавляет новые несовершенства строения (поперечные риски, подрезы), которые служат концентраторами напряжений.

Термомеханическая обработка является наиболее перспективным способом повышения прочности стальных деталей [1-3]. Применительно к патронному производству для повышения прочности сердечников

целесообразно использовать предварительную термомеханическую обработку (ПТМО). При такой обработке холодная пластическая деформация предшествует термической обработке и может быть отделена от последней в технологическом цикле термомеханической обработки значительным промежутком времени. Последнее обстоятельство определяет высокую технологичность ПТМО при производстве деталей из холоднодеформированных металлических полуфабрикатов. Изменения, вносимые холодной пластической деформацией, оказывают положительное влияние на фазово-структурные превращения при последующей термообработке сталей [4]. Режим последующей термической обработки следует подбирать таким образом, чтобы изменения, вызванные в структуре стали холодным наклепом, были возможно полнее сохранены и оптимальным образом видоизменены. Поэтому представляется перспективным направлением применение ПТМО на основе использования способов предварительной интенсивной пластической деформации (ИПД), обеспечивающей получение мелкокристаллической структуры.

Задачи исследования сводились к тому, чтобы выбрать:

1. оптимальный способ интенсивной пластической деформации;
2. наиболее эффективные режимы ПТМО (степень деформации, время скоростного нагрева под закалку).

В соответствии с поставленными задачами в работе предложен вариант способа уширяющей экструзии для осесимметричных деталей [5]. Особенностью этого метода является последовательное изменение формы поперечного сечения деформируемой заготовки путем сдвиговой деформации при сохранении постоянства площади поперечного сечения. При уширяющей экструзии после завершения очередного цикла деформации происходит небольшое уменьшение поперечного сечения профиля, что позволяет создать противодействие и многократно пропускать заготовку через одну матрицу, накапливая деформацию. Противодействие обеспечивает заполнение полости матрицы.

В работе выполнено компьютерное моделирование процесса уширяющей экструзии с определением силовых параметров, характера течения металла в очаге пластической деформации, напряженно-деформированного состояния, деформационного упрочнения. Сделаны следующие выводы:

1. знакопеременный характер деформирования обеспечивает снижение технологических усилий, действующих на рабочий инструмент;
2. степень упрочнения цилиндрических образцов увеличивается от периферии к центру (оси вращения), что обеспечивает оптимальные условия против хрупкого разрушения от действия изгибающих моментов.

Для реализации процесса уширяющей экструзии разработан и изготовлен опытный штамп с применением матрицы сборной конструкции, которая имеет канал с промежуточными различно ориентированными сечениями. Высокая точность, предъявляемая к размерам рабочих деталей штампа, обеспечивает надежное крепление этих деталей между собой, а также сводит к минимуму возможность перекоса элементов матрицы относительно друг друга, при сборке и функционировании штампа.

Исследовано влияние предварительной интенсивной пластической деформации на механические свойства материала после термообработки (заковки и отпуска) в зависимости от степени деформации и времени нагрева под закалку токами высокой частоты.

В качестве независимых переменных были выбраны: степень деформации ( $X_1$ ), время выдержки заготовки при нагреве токами высокой частоты ( $X_2$ , с). Зависимой переменной являлась твердость по Роквеллу ( $y$ , HRC). Локальная область определения факторов установлена из априорных соображений. Каждый из факторов варьировался на двух уровнях. Для получения возможно более полной информации об изучаемых зависимостях использован полный факторный эксперимент  $2^2$ .

В качестве исследуемых материалов использовались стали 70, У10А и У12А, из которых были изготовлены образцы диаметром 6 мм и длиной 20 мм. Пластическая деформация осуществлялась способом интенсивной пластической деформации – уширяющей экструзии цилиндрических образцов, направленной на получение ультрамелкозернистой структуры. Заготовки после деформации имели форму цилиндра со слегка искаженными торцами диаметром 5,6 мм и длиной 22,5 мм. Закалку выполняли с помощью высокочастотного генератора ВЧГ1-60/0,066УХ14 (установленная мощность 14 кВт) поштучно. Данный способ предотвращает рост зерна, то есть сохраняет мелкозернистую структуру. Время выдержки измеряли секундомером. Затем заготовки опускали в ванну, содержащую 10% раствор поваренной соли. После заковки проводили отпуск (2% раствор  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , 4 часа, 100 °С). После чего заготовки охлаждали на воздухе. После термической обработки образцы очищались от окалины. Поверхности заготовок, на которых измерялась твердость, шлифовались для получения низкой шероховатости и обеспечения параллельности. Затем измерялась твердость на приборе ТК-2М. В качестве характеристики механических свойств принималась твердость HRC. По результатам эксперимента получены модели. Для стали 70 модель имеет следующий вид:

$$HRC = 67,3 - 0,2 \cdot X_1 - 0,1 \cdot X_2,$$

где  $X_1 = 0,7...1,6$ ,  $X_2 = 7...10$  с – область применения.

Все соображения о направлении и силе влияния факторов на твердость можно высказать только для выбранных в работе интервалов их изменения. Наиболее высокая твердость стали 70 при наименьшей степени предварительной холодной пластической деформации и наименьшем времени скоростного нагрева под закалку. Аналогичные зависимости получены для сталей У10А и У12А. Следовательно, сердечники, изготовленные по данным режимам ПТМО, будут иметь наибольшую прочность.

Работа выполнена под руководством профессора, кандидата технических наук Н. П. Агеева.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Бернштейн М.Л.* Термомеханическая обработка металлов и сплавов. Том II. М.: издательство «Металлургия», 1968. 574 с.
2. *Смагоринский М.Е., Булянда А.А., Кудряшов С.В.* Справочник по термомеханической и термоциклической обработке металлов. СПб.: Политехника, 1992. 416 с.
3. *Агеев Н.П., Терещенко В.Г.* Исследование технологических возможностей процессов упрочнения при изготовлении бронебойных сердечников пуль. Материалы докладов международной конференции «Седьмые Окуневские чтения». СПб.: БГТУ, 2011. С. 158-160.
4. *Терещенко В.Г.* Исследование влияния предварительной термомеханической обработки на свойства инструментальной стали У12А. Сборник материалов IV Общероссийской молодежной научно-технической конференции «Молодежь, техника, космос». СПб.: БГТУ, 2012. С. 222-224.
5. *Агеев Н.П., Терещенко В.Г.* Получение материалов с субмикроструктурной структурой методами экструзии. Сборник материалов IV международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». М.: ИМЕТ РАН, 2011. С. 166-167.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ СИЛОВОЙ ОБОЛОЧКИ КОРПУСА РДТТ В КОНЦЕ ЕГО УТИЛИЗАЦИИ МЕТОДОМ БЕССОПЛОВОГО СЖИГАНИЯ

**Д.А. ЯГОДНИКОВ, О.А. КУЛИКОВА**

*Московский государственный технический университет  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5,  
т. (499) 267-89-03, (499) 263-64-52, E-mail [daj@bmstu.ru](mailto:daj@bmstu.ru)*

После истечения гарантийного срока хранения ракетного двигателя на твердом топливе (РДТТ) встает вопрос о его утилизации. В составе РДТТ основную часть занимает твердое ракетное топливо (ТРТ), как правило, прочно скрепленное с внутренней стенкой корпуса двигателя. Для утилизации зарядов смесового твердого ракетного топлива предложен целый ряд методов, таких как уничтожение заряда, путем подрыва или сжигания и удаления топлива из корпуса РДТТ. Каждому из методов присущи свои недостатки. Достаточно простым является утилизация топлива методом сжигания в составе РДТТ с использованием стендовых комплексов. Двигатель без соплового блока или без сопла и крышки устанавливаются в горизонтальном положении на специальном стапеле, обеспечивающем его удержание на стенде при горении.

При снятом сопловом блоке критическим сечением вместо минимального сечения сопла с диаметром  $d_{кр}$  (рис. 1, а) становится выходное сечение в сопловом фланце с диаметром  $d_{ф}$  (рис. 1, б), превышающем  $d_{кр}$ . В соответствии с уравнением внутренней баллистики давление в камере сгорания и, соответственно, скорость горения ТРТ уменьшаются. При этом увеличивается время работы двигателя, а, следовательно, и время контакта высокотемпературных продуктов сгорания со стенками камеры сгорания.

Цель настоящей работы – определение теплового состояния силовой оболочки корпуса РДТТ в конце его утилизации при бессопловом сжигании.

Рассматривался модельный РДТТ с зарядом из смесового топлива прочно скрепленного с корпусом двигателя. Силовая оболочка корпуса РДТТ выполнена из органопластика типа Армос, а в качестве теплозащитного покрытия (ТЗП) камеры сгорания использован эластичный абляционный материал с внешним уносом массы.

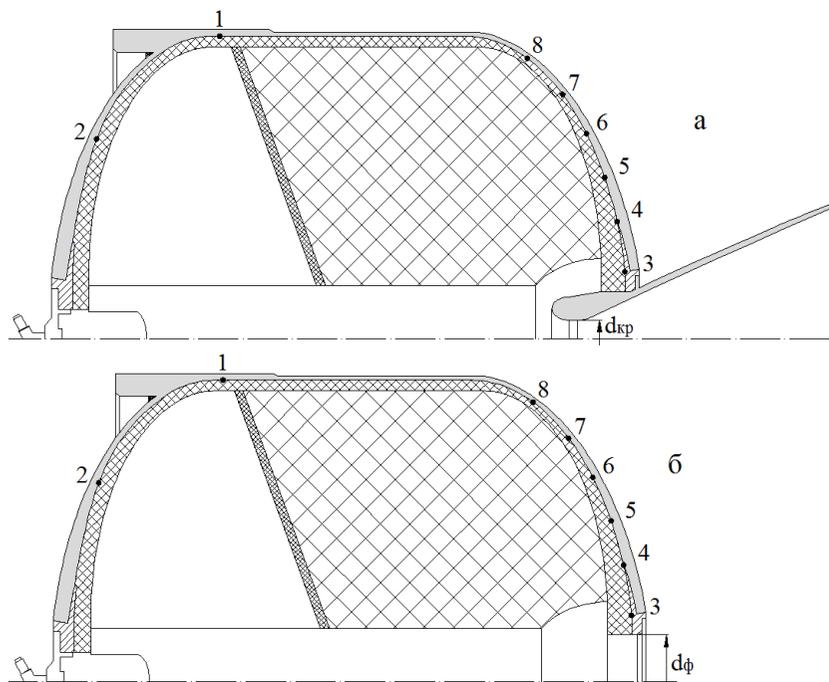


Рис.1. Характерные зоны корпуса РДТТ: а – штатная работа РДТТ; б – утилизация РДТТ; характерные зоны: 1 – цилиндрический участок над щелью, 2 – зона переднего днища, 3–8 – зоны заднего днища

Расчет конвективных тепловых потоков проводился по методике В.С. Авдеевского, радиационный тепловой поток определялся по формуле Стефана-Больцмана. Потребная толщина ТЗП в камере сгорания двигателя рассчитывалась для РДТТ, работающего на штатном режиме с давлением в камере 6,5 МПа и температуре продуктов сгорания 3615 К. Сжигание топлива при утилизации проходило при давлении в камере 0,8 МПа и температуре продуктов сгорания 3360 К.

Результаты расчетов свидетельствуют, что при утилизации плотность тепловых потоков меньше, чем при штатной работе РДТТ (рис. 2). При этом уменьшается толщина выгоревшего ТЗП и увеличивается слой ТЗП, необходимый для поддержания температуры силовой оболочки в допустимом диапазоне ( $T_m \leq 500$  К).

Наименьшая температура силовой оболочки корпуса модельного РДТТ в конце утилизации наблюдается на цилиндрическом участке корпуса (зона 1, рис. 1, б) и на заднем днище, вблизи соплового блока (зоны 3–6). Температура силовой оболочки в районе переднего днища

(зона 2) не превышает допустимое значение. Максимальная температура силовой оболочки корпуса РДТТ, превышающая допустимую на 86 градусов, достигается в зоне сопряжения заднего днища и цилиндрической обечайки (зона 8). Это наиболее опасная зона, поэтому в процессе утилизации РДТТ необходимо разрабатывать специальные меры наружного охлаждения корпуса РДТТ с целью предотвращения возникновения пожароопасных ситуаций.

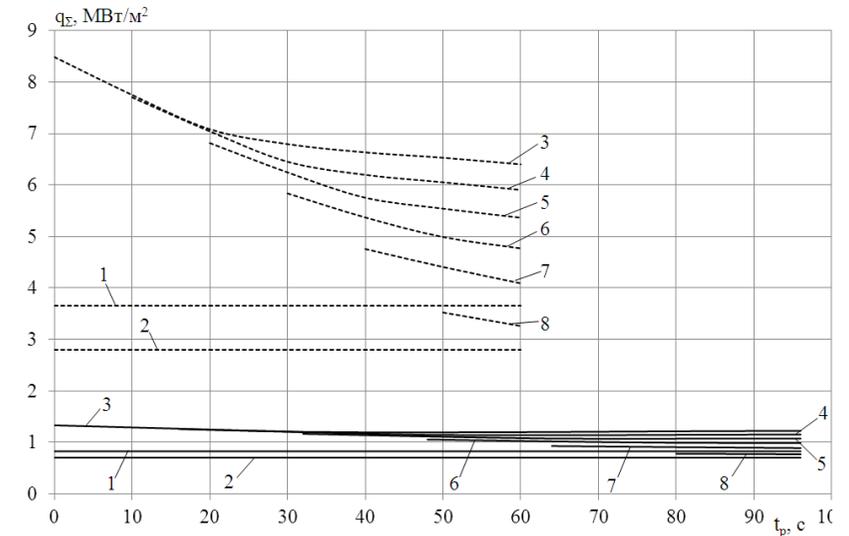


Рис. 2. Изменение суммарного теплового потока к элементам конструкции камеры сгорания во время работы двигателя: ----- – штатная работа РДТТ; – утилизация РДТТ; характерные зоны: 1 – цилиндрический участок над щелью, 2 – зона переднего днища, 3–8 – зоны заднего днища

## АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

<b>А</b>	
Абдуллин И.А. ....	206
Агеев Н.П. ....	166
Андреев А.С. ....	31
Антонова Е.А. ....	169
<b>Б</b>	
Бабий Ю.И. ....	82
Бабук В.А. ....	84
Баранов П.А. ....	129
Белобородов М.Н. ....	14,15
Белов И.В. ....	170
Беляков В.И. ....	14,15
Белянин Д.Г. ....	178
Бестужева Т.А. ....	9
Бигаева М.Т. ....	52
Болотников А.В. ....	40
Борбузанов В.Г. ....	97
Буркин В.В. ....	88
Буркина Р.С. ....	88
Бурцев Ю.П. ....	56
<b>В</b>	
Вагин А.В. ....	15,16,173,187
Васильев В.Ф. ....	92
Ватутин Н.М. ....	176
Ведерников М.В. ....	178
Виноградов А.В. ....	16
Воронько О.В. ....	18
<b>Г</b>	
Гаврилов А.А. ....	129
Гаращенко А.Н. ....	95
Гарбузова Т.В. ....	44
Гиниятов Х.З. ....	97
Голованова Е.В. ....	44
Грайворонский С.А. ....	101,105,110
Гранкин А.Н. ....	66
Грек В.О. ....	187,202
Гувернюк С.В. ....	129
<b>Д</b>	
Давыдов Э.Н. ....	151
Дектерев А.А. ....	129
Домуховский А.М. ....	88
<b>Е</b>	
Егоров В.В. ....	118
Елесин В.В. ....	122
Емельянов И.А. ....	176
Ефремов Н.Ю. ....	52
<b>Ж</b>	
Жарков М.В. ....	126
Жуков Д.Н. ....	126
Жуков И.Е. ....	22
<b>З</b>	
Зайцев А.В. ....	23,27
Закариев Г.З. ....	191
Затеруха Е.В. ....	166
Зибаров А.В. ....	122
Зинина С.С. ....	180
<b>И</b>	
Ибрагимов Н.Г. ....	8
Ибрагимов Э.Н. ....	8
Ивоненко А.Н. ....	84
Игнатъев О.В. ....	56
Исаев С.А. ....	129
<b>К</b>	
Казимиров А.В. ....	178
Карелин В.А. ....	173,191
Кислинский И.В. ....	151
Князев А.Н. ....	131
Князева А.Г. ....	183
Колеров А.С. ....	176,208
Колесников Г.И. ....	151
Колесниченко С.В. ....	72
Колтунов В.В. ....	176
Корепанов М.А. ....	184
Кочелаевская В.С. ....	187,202
Кочелаевская И.С. ....	173,191
Кочкин А.В. ....	176
Краснобаев Ю.А. ....	173,187,191,202
Крестовский А.Н. ....	195
Кропачева И.В. ....	35
Круглов И.А. ....	56
Кузнецов Н.П. ....	47
Куликов В.Н. ....	9
Куликова О.А. ....	213
Куприн Г.Н. ....	198
Куфтырев К.А. ....	139
Кэрт Б.Э. ....	129

<b>Л</b>	
Легкоступов В.Н. ....	58
Леонова Е.Л. ....	66
Логаткин С.М. ....	31,201
Лопатин В.В. ....	183
Лушнов А.В. ....	206
<b>М</b>	
Максименко М.А. ....	32,141
Максимов Ф.А. ....	122
Марков И.В. ....	161
Мартемьянов С.М. ....	183
Маслов А.Л. ....	183
Матвеев А.А. ....	9
Матухин Е.Л. ....	97
Мелешко В.Ю. ....	173,187,191,202
Мерживский Л.А. ....	145
Мингазов А.Ш. ....	206
Могильников К.А. ....	131,146
Морозов В.И. ....	62,66
<b>Н</b>	
Набоков Ф.В. ....	146
Недосекин И.А. ....	66
Никора А.Г. ....	205
<b>О</b>	
Осавчук А.Н. ....	9
Осадчий А.В. ....	151
Оськин К.С. ....	67
<b>П</b>	
Павловец Г.Я. ....	35,187
Пизаев А.О. ....	16
Пирогов С.Ю. ....	178
Поздеев С.В. ....	72
Понятский В.М. ....	151
Пырьев В.А. ....	15
<b>Р</b>	
Резников М.С. ....	206
Романова И.П. ....	35
Рудзинский В.П. ....	95
<b>С</b>	
Савин А.В. ....	159
Садовский В.В. ....	56
Самитов И.М. ....	97
Семашкин Е.Н. ....	40,44
Сесина Е.А. ....	52
Сидоров А.И. ....	206
Сидоров И.М. ....	176
Сидоров М.И. ....	16,208
Слитков М.Н. ....	95
Сметанин С.Д. ....	39
Сметанников О.Ю. ....	146
Смирнов А.С. ....	18
Смирнов И.М. ....	161
Смирнов П.Г. ....	159
Снегур И.Б. ....	22
Сорокин С.В. ....	18
Спивак И.А. ....	201
Спиридонов В.В. ....	78
Стрижак С.В. ....	159
Судаков А.Г. ....	129
<b>Т</b>	
Теплова Т.А. ....	208
Терещенко В.Г. ....	209
Тимофеев Н.Е. ....	206
Титов В.В. ....	122
<b>У</b>	
Усачов А.Е. ....	129
<b>Ф</b>	
Федорищева В.Г. ....	151
Филиппов А.А. ....	8
Фроленок М.А. ....	178
<b>Х</b>	
Хижняк А.Е. ....	39
<b>Ч</b>	
Чернов В.В. ....	126
<b>Ш</b>	
Шаклеин А.А. ....	184
Шацких Ю.В. ....	14
Шипунов А.Г. ....	40,44
<b>Ю</b>	
Юртиков Р.А. ....	47
<b>Я</b>	
Яковчук М.С. ....	163

**СОДЕРЖАНИЕ****СЕКЦИЯ 7. Проблемы создания боеприпасов повышенной стойкости к внешним воздействиям**

- 7.1. Перспективы разработки эффективных путей снижения разгарно-эрозионного действия пороховых газов.  
**Н.Г. Ибрагимов, Э.Н. Ибрагимов, А.А. Филиппов** .....8
- 7.2. Влияние содержания и размера частиц металлического горючего и окислителя в многокомпонентных составах на их взрывчатые и энергетические характеристики. **А.А. Матвеев, В.Н. Куликов, А.Н. Осавчук, Т.А. Бестужева** .....9

**СЕКЦИЯ 8. Методы и средства полигонных испытаний и измерений**

- 8.1. Расчет внутрибаллистических характеристик артиллерийских зарядов на основе манометрических испытаний.  
**М.Н. Белобородов, В.И. Беляков, Ю.В. Шацких** ..... 14
- 8.2. Конструкторско-технологическое решение программно-аппаратного комплекса траекторных измерений высокоточных боеприпасов. **А.В. Вагин, М.Н. Белобородов, В.И. Беляков, В.А. Пырьев** .....15
- 8.3. Разработка экспериментальной базы для испытаний средств инженерного вооружения. **А.В. Вагин, А.В. Виноградов, А.О. Пизаев, М.И. Сидоров** ..... 16
- 8.4. Оценка температуры взрывного облака энергетического материала.  
**О.В. Воронько, А.С. Смирнов, С.В. Сорокин** .....18
- 8.5. Средства измерений при проведении полигонных испытаний.  
**И.Е. Жуков, И.Б. Снегур** ..... 22
- 8.6. Метод обоснования требований к системе исходных данных многопараметрического прогнозирования.  
**А.В. Зайцев** .....23
- 8.7. Модели прогнозирования технического состояния ракет сухопутных войск. **А.В. Зайцев** ..... 27
- 8.8. Методы контроля противоударной стойкости бронешлемов при непробитии поражающими элементами. Современное состояние и перспективы. **С.М. Логаткин, А.С. Андреев** .....31
- 8.9. Методика синтеза систем контроля технического состояния.  
**М.А. Максименко** .....32

8.10. Методы оценки качества ультра- и нанодисперсных компонентов энергоёмких композитов. <b>Г.Я. Павловец, И.П. Романова, И.В. Кропачева</b> .....	35
8.11. Прогнозирование температуры нагрева ствола артиллерийского орудия при режимной стрельбе. <b>С.Д. Сметанин, А.Е.Хижняк</b> .....	39
8.12. Исследование влияния мощности дымообразования и температуры шлейфа РДТТ на видимость объектов в тепловизор. <b>А.Г. Шипунов, Е.Н. Семашкин, А.В. Болотников</b> .....	40
8.13. Экспериментальное определение мощности дымообразования РДТТ посредством зондирования затопленной струи. <b>А.Г. Шипунов, Е.Н. Семашкин, Т.В. Гарбузова, Е.В. Голованова</b> ....	44
8.14. Разработка метода косвенной идентификации расчета значений силового тензора соплового блока по параметрам истекающей из него сверхзвуковой несимметричной газовой струи <b>Р.А. Юртиков, Н.П. Кузнецов</b> .....	47
<b>СЕКЦИЯ 9. Информационные и управляющие системы</b>	
9.1. Факторы, влияющие на качество изображения, получаемого в зондовом микроскопе в режиме АСМ. <b>М.Т. Бигаева, Н.Ю. Ефремов, Е.А. Сесина</b> .....	52
9.2. Центр высокопроизводительных вычислений – основа для создания перспективного артиллерийского вооружения. <b>Ю.П. Бурцев, О.В. Игнатъев, И.А. Круглов, В.В. Садовский</b> .....	56
9.3. Оптимальное проектирование многоцелевых операций на станках с ЧПУ с применением метода роя частиц. <b>В.Н. Легкоступов</b> .....	58
9.4. Связь точности теленавещения малогабаритных ракет с обобщенными параметрами системы управления. <b>В.И. Морозов</b> .....	62
9.5. Система углового склонения малогабаритной ракеты вертикального старта. <b>В.И. Морозов, И.А. Недосекин, Е.Л. Леонова, А.Н. Гранкин</b> .....	66
9.6. Применение программно-аппаратных комплексов при автономной проверке электронного оборудования. <b>К.С. Оськин</b> .....	67
9.7. Имитационная модель функционирования бесплатформенной инерциальной навигационной системы ракет. <b>С.В. Поздеев, С.В. Колесниченко</b> .....	72

9.8. Основные методы сегментации полутоновых изображений в современных системах технического зрения.

**В.В. Спиридонов** ..... 78

## **СЕКЦИЯ 10. Новые компьютерные технологии и средства компьютерного моделирования при проектировании**

10.1. Повышение эффективности сложных технических объектов на основе современной технологий оптимизации IOSO.

**Ю.И. Бабий** ..... 82

10.2. Средства для оценки характеристик конденсированных продуктов у поверхности горящего топлива.

**В.А. Бабук, А.Н. Ивоненко** ..... 84

10.3. Математическая модель зажигания конденсированного заряда баллистической установки мощным импульсом излучения.

**В.В. Буркин, Р.С. Буркина, А.М. Домуховский** .....88

10.4. Метод обоснования значений проектных параметров при баллистическом проектировании оперативно-тактических и тактических ракет.

**В.Ф. Васильев** ..... 92

10.5. Компьютерное моделирование высокотемпературного воздействия на элементы изделий ракетной и артиллерийской техники из композиционных материалов.

**А.Н. Гарашенко, М.Н. Слитков, В.П. Рудзинский** ..... 95

10.6. Обновленная производственно-технологическая база изготовления нитратов целлюлозы и порохов.

**Х.З. Гиниятов, И.М. Самитов, В.Г. Борбузанов, Е.Л. Матухин** .....97

10.7. Метод оценки технического уровня образцов ракетно-артиллерийского вооружения.

**С.А. Грайворонский** .....101

10.8. Практические предложения по принятию решения о возможности и целесообразности модернизации образцов ракетно-артиллерийского вооружения сухопутных войск.

**С.А. Грайворонский** ..... 105

10.9. Метод оценки модернизационного потенциала образцов ракетно-артиллерийского вооружения на основе прогнозной регрессионной модели изменения их технического уровня в процессе эволюционного развития.

**С.А. Грайворонский** .....110

10.10. Некоторые вопросы автоматизации проектирования и анализа работоспособности стволов артиллерийских орудий.

**В.В. Егоров** ..... 118

10.11. Оценка производительности кластера Fujitsu при решении задач вычислительной аэродинамики. <b>В.В. Елесин, А.В. Зибаров, Ф.А. Максимов, В.В. Титов</b> .....	122
10.12. Разработка алгоритма расчета наддульных устройств в пакете вычислительной газодинамики. <b>Д.Н. Жуков, В.В. Чернов, М.В. Жарков</b> .....	126
10.13. Пакетные вычислительные технологии на основе обобщенной процедуры коррекции давления (объединение VP2/3 и $\sigma$ -FLOW) для решения задач аэротермогазодинамики. <b>С.А. Исаев, А.Г. Судаков, С.В. Гувернюк, П.А. Баранов, А.А. Дектерев, А.А. Гаврилов, Б.Э. Кэрт, А.Е. Усачов</b> .....	129
10.14. Создание виртуальной модели манипулятора с гидравлической системой управления с помощью программных комплексов ADAMS и пакета моделирования гетерогенных технических систем. <b>А.Н. Князев, К.А. Могильников</b> .....	131
10.15. Облачные многопроцессорные вычисления для моделирования процессов газофазного диффузионного горения с помощью OpenFOAM. <b>К.А. Куфтырев</b> .....	139
10.16. Методика обработки многомерной исходной информации отличающаяся повышенной точностью. <b>М.А. Максименко</b> .....	141
10.17. О современных моделях динамического деформирования и разрушения конструкционных материалов. <b>Л.А. Мержиевский</b> .....	145
10.18. Создание виртуального прототипа и математической модели противооткатного устройства в пакете MSC.EASY5. <b>Ф.В. Набоков, О.Ю. Сметанников, К.А. Могильников</b> .....	146
10.19. Использование унифицированной модели среды MATLAB для исследования динамики стрелкового вооружения. <b>В.М. Понятский, Э.Н. Давыдов, А.В. Осадчий, Г.И. Колесников, В.Г. Федорищева, И.В. Кислинский</b> .....	151
10.20. Численное моделирование сверхзвуковых газовых недорасширенных струй в пакете OpenFOAM с использованием облачных технологий <b>А.В. Савин, П.Г. Смирнов, С.В. Стрижак</b> .....	159
10.21. Особенности численного моделирования процесса взрывного метания группы тел. <b>И.М. Смирнов, И.В. Марков</b> .....	161
10.22. Численное моделирование реверса управляющего усилия при вдуве струи в перерасширенное сопло. <b>М.С. Яковчук</b> .....	163

**СЕКЦИЯ 11. Безопасность, экологичность, технологии  
производства и утилизации**

- 11.1. Математические модели комплексных технологических процессов формирования механических свойств нагружаемых металлических элементов выстрелов.  
**Н.П. Агеев, Е.В. Затеруха** ..... 166
- 11.2. Нанесение защитного покрытия методом центробежного литья.  
**Е.А. Антонова** ..... 169
- 11.3. Создание искусственного топливного материала с использованием устаревших баллистических порохов и промышленных отходов. **И.В. Белов** ..... 170
- 11.4. Выжигание взрывчатого наполнения артиллерийских снарядов.  
**А.В. Вагин, В.А. Карелин, В.Ю. Мелешко,  
Ю.А. Краснобаев, И.С. Кочелаевская** ..... 173
- 11.5. Методы утилизации фосфорсодержащих дымовых боеприпасов.  
**Н.М. Ватугин, И.А. Емельянов, А.С. Колеров,  
В.В. Колтунов, А.В. Кочкин, И.М. Сидоров** ..... 176
- 11.6. Способ улучшения экологических характеристик ракет-носителей на основе утилизации остатков компонентов ракетного топлива в отделившихся ступенях.  
**М.В. Ведерников, А.В. Казимиров,  
М.А. Фроленок, Д.Г. Белянин, С.Ю. Пирогов** ..... 178
- 11.7. Экологичность бурового шлама и его утилизация.  
**С.С. Зинина** ..... 180
- 11.8. Исследование математической модели термического разложения сланцев при их нагреве электромагнитным полем.  
**А.Г. Князева, А.Л. Маслов, В.В. Лопатин, С.М. Мартемьянов** ..... 183
- 11.9. Численное моделирование процесса тушения водой струи продуктов сгорания ракетного двигателя.  
**М.А. Корепанов, А.А. Шаклеин** ..... 184
- 11.10. Утилизация малогабаритных рдтт в реакторах с кипящим слоем.  
**Ю.А. Краснобаев, А.В. Вагин, В.Ю. Мелешко,  
Г.Я. Павловец, В.О. Грек, В.С. Кочелаевская** ..... 187
- 11.11. Регенерация тепла при сжигании РДТТ.  
**Ю.А. Краснобаев, В.А. Карелин,  
В.Ю. Мелешко, Г.З. Закариев, И.С. Кочелаевская** ..... 191
- 11.12. Технология производства жестких сгораемых картузов модульных метательных зарядов из перспективных сгораемых материалов. **А.Н. Крестовский** ..... 195

11.13. Новая технология пожарной защиты особо взрывопожароопасных объектов с помощью быстродействующей автоматической системы пожаротушения (БАСП) «ПУРГА».	
<b>Г.Н. Куприн</b> .....	198
11.14. Разработка баллистического стенда-имитатора конечностей человека для оценки эффективности тканевых малослойных противоосколочных средств защиты при их непробитии поражающими элементами.	
<b>С.М. Логаткин, И.А. Спивак</b> .....	201
11.15. Процесс сжигания взрывчатых веществ в инсинераторах с кипящим слоем. <b>В.Ю. Мелешко, Ю.А. Краснобаев, В.О. Грек, В.С. Кочелаевская</b> .....	202
11.16. Создание комплекта систем и устройств, обеспечивающего высокоэффективную противопожарную и противовзрывную защиту хранилищ и погребов боезапаса новых комплексов оружия НК ВМФ.	
<b>А.Г. Никора</b> .....	205
11.17. Экологически безопасные льдообразующие композиции для новых противораковых ракет.	
<b>М.С. Резников, Н.Е. Тимофеев, И.А. Абдуллин, А.И. Сидоров, А.Ш. Мингазов, А.В. Лушнов</b> .....	206
11.18. Приведение испытательного комплекса по отработке РДТТ к экологическим требованиям по очистке продуктов сгорания.	
<b>М.И. Сидоров, Т.А. Теплова, А.С. Колеров</b> .....	208
11.19. Исследование технологических возможностей применения процессов предварительной термомеханической обработки на основе метода уширяющей экструзии для повышения прочности стальных сердечников пуль. <b>В.Г. Терещенко</b> .....	209
11.20. Определение теплового состояния силовой оболочки корпуса РДТТ в конце его утилизации методом бессоплового сжигания.	
<b>Д.А. Ягодников, О.А. Куликова</b> .....	213

Оригинал-макет оформлен при техническом содействии  
Учебно-научно-производственного центра  
компьютерных технологий  
(ООО «УНПЦ КОМТЕХ»),  
190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д.1.  
E-mail: Kert@mail.ru  
Компьютерное форматирование и верстка Е.В. Петрова

Подписано в печать 20.06.2012. Формат 60x84/16. Бумага документная.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л.14. Тираж 150 экз. Заказ № 129.  
Балтийский государственный технический университет.  
190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д.1.