

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

доктора технических наук, профессора, академика РАН

Закаменных Георгия Ивановича

на диссертацию Суфиянова Вадима Гарайхановича

«Решение задачи комплексного моделирования артиллерийского выстрела с применением визуальных технологий для проектирования и отработки артиллерийских систем», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальностям:

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (в науке и технике) и 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

### **1. Актуальность темы диссертационной работы**

В диссертации Суфиянова В.Г. решается важная и актуальная проблема комплексного моделирования артиллерийского выстрела для проектирования и отработки артиллерийских систем, при решении которой автор широко использует теорию системного анализа, современные информационные технологии обработки информационных потоков, разрабатывает новые и совершенствует существующие численные методы и алгоритмы.

При исследовании объекта как системы, прежде всего, рассматриваются системные связи между его частями. Такой подход объясняется тем, что структурные и функциональные связи накладывают ограничения на процессы функционирования объекта в целом. Использование системного подхода и адекватных математических моделей позволяет комплексно решать задачи исследования и оптимизации эффективности действия снарядов на этапе проектирования артиллерийских систем. В диссертационной работе автором представлен системный подход при разработке программно-вычислительного комплекса и моделирования всех этапов процесса артиллерийского выстрела.

Несомненный интерес также представляют результаты моделирования системы полигонных испытаний, где качество измерений и регистрации параметров внешнебаллистической траектории снарядов и безопасность проведения испытаний имеют первостепенное значение. Решение совместной задачи комплексного моделирования процессов артиллерийского выстрела и функциони-

рования измерительно-регистрирующей аппаратуры, позволяет оптимизировать процесс расстановки измерительных устройств по траектории снаряда и позволяет более качественно фиксировать все этапы артиллерийского выстрела. Особенно это важно при проведении стрельбовых испытаний на этапе отработки, когда имеется большая неопределенность в параметрах функционирования изделий.

Сегодня, когда активно воплощается в жизнь программа технического перевооружения вооруженных сил Российской Федерации, для ускорения процессов проектирования, создания, полигонных испытаний и поставки вооружения в армейские подразделения необходимо разрабатывать современные программные средства, обладающие широкими возможностями адекватного физико-математического моделирования артиллерийских систем, сравнительного анализа и отображения результатов моделирования.

Таким образом, тема рецензируемой диссертации Суфиянова В.Г. «Решение задачи комплексного моделирования артиллерийского выстрела с применением визуальных технологий для проектирования и отработки артиллерийских систем» является важной и актуальной.

## **2. Структура и содержание диссертационной работы**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка основных сокращений и обозначений, списка литературы из 185 наименований и 4 приложений. Общий объем работы 315 страниц, включая 179 рисунков и 32 таблицы.

Во **введении** обоснована актуальность диссертационного исследования, определены цели и задачи работы, объект и предмет исследования, представлены научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, достоверность и обоснованность полученных в диссертации результатов. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Указаны внедрение и реализация результатов работы, апробация работы на научных форумах, основные публикации и личное участие автора в проведении диссертационного исследования.



**В первой главе** автором рассмотрены и системно проанализированы основные этапы моделирования, которые включают решение задач внутренней и внешней баллистики, взаимодействия снаряда с объектом поражения (конечная или терминальная баллистика), а также задачи расстановки измерительно-регистрирующей аппаратуры на полигоне и определения параметров ее функционирования при полигонных испытаниях. Представлена функциональная структура программного комплекса моделирования и визуализации полигонных испытаний.

**Вторая глава** содержит результаты разработки виртуальных моделей рельефа, инфраструктуры полигона и объектов полигонных испытаний. Рассмотрены вопросы преобразования различных систем координат при создании виртуальной карты полигона. Приведены виртуальные модели объектов полигонных испытаний, измерительно-регистрирующего комплекса и их составных частей, а также представлены их числовые характеристики, используемые при математическом моделировании.

**В третьей главе** представлена задача комплексного физико-математического моделирования процесса артиллерийского выстрела.

Рассмотрена основная задача внутренней баллистики и представлена схема решения системы уравнений, описывающих газодинамические процессы, на основе совместного эйлерово-лагранжева метода. Рассмотрен и обоснован метод численного решения сопряженной задачи гидромеханики многофазных гетерогенных сред и нестационарного эрозионного горения на неравномерной сетке с адаптацией расчетной области к прогретому слою.

Представлена математическая модель напряженно-деформированного состояния ствола артиллерийского орудия в процессе выстрела и методика моделирования прочностных характеристик с динамическими граничными условиями на внутренней поверхности ствола.

Описана математическая модель движения снаряда на траектории, методика проведения расчета коэффициентов аэродинамических сил и моментов на

основе решения задачи гидродинамического обтекания снаряда и метод численного моделирования внешнебаллистических процессов.

Модель бронепробития представлена на основе соотношений, описывающих движение сжимаемых упругопластических сред, которые базируются на законах сохранения массы, импульса и энергии и замыкаются соотношениями Прандтля-Рейсса при условии текучести Мизеса. Также описан метод сглаженных частиц, с помощью которого проводилось моделирование процесса бронепробития.

Проблема разлета осколков решается на основе имитационного моделирования движения частиц с начальными условиями, определяемыми из физических характеристик взрывчатых веществ и материала оболочки снаряда. В работе предложен алгоритм построения зон поражения с учетом рельефа местности.

В **четвертой главе** приведено описание программного комплекса моделирования и визуализации полигонных испытаний. Представлена общая схема программного комплекса, которая состоит из атрибутивной базы данных, расчетных блоков и блока конфигурации и визуализации полигонных испытаний. Приведено описание программных интерфейсов расчетных блоков моделирования внутренней баллистики, внешней баллистики, бронепробития, разлета осколков и блока визуализации полигонных испытаний. Представлена структура базы данных и описана структурная схема взаимодействия блоков программного комплекса с вычислительной системой ANSYS Autodyn.

**Пятая глава** посвящена результатам применения комплексного компьютерного визуального моделирования для решения задач проектирования и отработки артиллерийских систем. Представлены результаты тестирования методов численного решения сопряженной задачи гидромеханики многофазных гетерогенных сред и нестационарного эрозионного горения на неравномерной адаптивной сетке. Предложен генетический алгоритм многопараметрической оптимизации параметров термодинамических моделей внутренней баллистики по



результатам решения внутрибаллистической задачи в газодинамической постановке.

Проведено исследование внутрибаллистических процессов и сравнение с результатами натурального эксперимента. Решена связанная задача внутренней баллистики и напряженно-деформированного состояния ствола 125 мм пушки с динамическими граничными условиями. Определена критическая область ствола, подверженная наиболее сильным деформациям.

Проведено исследование внешнебаллистических траекторий снарядов, рассчитанных с учетом коэффициентов аэродинамических сил и моментов, полученных на основе решения задачи гидродинамического обтекания снаряда. Представлены результаты сравнительного анализа траекторий, рассчитанных по стандартной и разработанной методике.

Проведено комплексное моделирование движения 125 мм бронебойно-подкалиберного снаряда с учетом внутренней структуры. Показано, что с увеличением массы снаряда дульная скорость значительно уменьшается, однако скорость подлета снаряда к цели на расстоянии 2000 м имеет максимум при определенной массе. Анализ бронепробития стальной гомогенной преграды показал, что существует возможность повышения проникающей способности снаряда за счет его внутренней структуры.

На основе имитационного моделирования разлета осколков проведено исследование эффективности осколочного действия снарядов. Представлены результаты 3D визуализации осколочного поля и зоны поражения с учетом рельефа местности.

Рассмотрена задача математического моделирования параметров функционирования измерительно-регистрирующей аппаратуры и ее оптимальной расстановки на виртуальном полигоне, а также построения зоны безопасности при проведении полигонных испытаний.

В **заключении** сформулированы основные научные и практические результаты диссертационной работы.

В приложениях представлены алгоритмы преобразования геодезических координат, код программы для задания динамических граничных условий при моделировании напряженно-деформированного состояния ствола артиллерийского орудия и акты внедрения диссертационной работы.

### **3. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций**

В диссертации автором достаточно полно проведено обоснование необходимости разработки комплексной математической модели процесса артиллерийского выстрела для достижения цели диссертационной работы.

Обоснованность полученных в диссертационной работе научных результатов, выводов и рекомендаций обеспечена использованием современного математического, алгоритмического и программного инструментария, использованного при проведении математического моделирования процессов артиллерийского выстрела и подтверждена сравнением результатов вычислительного и натурного эксперимента, а также сопоставлением с данными из литературных источников.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается и уровнем используемых автором методов исследований. Теоретическая часть диссертационной работы выполнена автором на основе теории систем и системного анализа; вычислительной гидродинамики и механики сплошных сред; теории упругости, пластичности и разрушения; теории удара; решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений и уравнений в частных производных; теории вероятностей и статистического имитационного моделирования.

Практическая часть диссертационной работы выполнена автором на основе методологии разработки объектно-ориентированных программ. При разработке программно-вычислительного комплекса для проведения расчетов и моделировании использовались программная среда разработки приложений Microsoft Visual Studio 2010 и Qt Creator. При разработке модулей программно-вычислительного комплекса использовались средства разработки трехмерных



приложений NeoAxis Engine, библиотеки OpenGL, Qwt и т.п. Ряд расчетов проводился в среде компьютерного инженерного моделирования ANSYS Fluent и Autodyn. Оценка работоспособности разработанного программно-вычислительного комплекса проводилась в процессе научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в ходе приемо-сдаточных испытаний на артиллерийском полигоне.

Выдвинутые в диссертации научные положения, выводы и рекомендации подтверждены также и их представительным обсуждением в научных изданиях, на научных конференциях международного и российского уровней, а также внедрением полученных в диссертации научно-технических решений на испытательном полигоне.

#### **4. Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций**

Все научные положения, выводы и рекомендации диссертационного исследования Суфиянова В.Г. обладают необходимой степенью достоверности и новизны.

Степень новизны научных положений, выводов и рекомендаций во многом определяется тем, что автор впервые комплексно подошел к решению задачи моделирования и отображения процессов, протекающих при артиллерийском выстреле (внутренняя, внешняя и терминальная баллистика), с позиции теории систем и системного анализа. С этих позиций в диссертационной работе Суфиянова В.Г. представлены результаты разработки нового математического и алгоритмического обеспечения для системного анализа и оптимизации параметров артиллерийского выстрела и принятия управленческих решений при проектировании артиллерийских систем.

Впервые реализована система трехмерной визуализации результатов комплексного моделирования процесса артиллерийского выстрела и функционирования измерительно-регистрирующих устройств при отработке артиллерийских систем в ходе полигонных испытаний.

В составе комплексной модели артиллерийского выстрела впервые реализован эффективный численный метод решения сопряженной задачи внутренней баллистики для различных конструкций заряда в газодинамической постановке и нестационарного эрозионного горения пороха на неравномерной адаптивной сетке. Автором представлены математическая модель и метод численного решения, позволяющие отказаться от параметров согласования, принятых в термодинамическом подходе и оцениваемых по экспериментальным данным.

Реализованы генетические алгоритмы многопараметрической оптимизации параметров термодинамических моделей внутренней баллистики и метод построения аппроксимирующих моделей зависимости внутрибаллистических параметров по результатам численных экспериментов.

Впервые разработана и реализована методика совместного динамического моделирования процессов внутренней баллистики и напряженно-деформированного состояния канала ствола. Данная методика, в отличие от предыдущих методов, основанных на максимальном давлении и упрощенном решении задачи Ляме-Гадолина, позволяет анализировать напряженно-деформированное состояние ствола в динамике.

В представленной работе реализована математическая модель движения снаряда по внешнебаллистической траектории, в которой, в отличие от стандартных методик, основанных на подборе коэффициентов для эталонных зависимостей по экспериментальным данным, коэффициенты аэродинамических сил и моментов получены на основе решения задачи гидродинамического обтекания, что позволяет более точно определять поведение снаряда на траектории в ходе проектных работ.

Разработан новый численный метод построения и визуализации плотности осколочного поля и области осколочного поражения с учетом рельефа местности на основе имитационного моделирования разлета осколков, который в отличие от стандартных методик позволяет более точно определять форму области осколочного поражения.



Разработанные модели, методы и алгоритмы позволили автору диссертационной работы создать новый проблемно-ориентированный программно-вычислительный комплекс моделирования артиллерийского выстрела и конфигурации полигонных испытаний на основе вычислительного эксперимента.

Вышесказанное подтверждает, что диссертационная работа, выполненная Суфияновым В.Г., содержит элементы новизны как по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (в науке и технике), так и по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Результаты работы достаточно полно отражены в публикациях автора.

Практическая значимость и полезность научных и прикладных результатов диссертационного исследования подтверждается актами внедрения.

## **5. Замечания по диссертационной работе.**

### **Глава 1**

1. Элементы артиллерийского заряда (Рисунок 1.4) содержат некоторые компоненты, составляющие метательный заряд, и дополнительно «параметры пороховых газов», которые физически не могут быть его элементами. Классификация снарядов по «возможности управления в полете на пассивные и активно-реактивные» не соответствует приведенному классификационному признаку.

2. Структура измерительно-регистрирующего комплекса полигонных испытаний не содержит средств динамических измерений поведения артиллерийского орудия, параметров дульной волны. Перечень измерительной аппаратуры крайне ограничен. Непонятен принцип его отбора.

3. Из стадий процесса моделирования без обоснований исключена промежуточная баллистика.

### **Глава 2**

Виртуальные 3D-модели объектов испытаний и измерительно-регистрирующей аппаратуры в настоящее время создаются в процессе разра-

ботки соответствующих образцов с использованием САД-систем. Непонятно, в чём заключается разработка виртуальных моделей в диссертационной работе.

### **Глава 3**

5. При моделировании внутренней баллистики конструкции комбинированных метательных зарядов содержат искусственно сформированные варианты. В то же время, отсутствуют реально применяемые и широко распространённые схемы: насыпной заряд зерненного пороха с осевым воспламенительным устройством (флейтой); центральный пучок трубчатого пороха и периферийная часть из зерненного пороха.

6. В процессе моделирования внутренней баллистики не рассматривается динамика движения снаряда по каналу ствола и формирование условий его вылета для корректного решения задачи промежуточной и внешней баллистики.

7. Имеются повторения в записи одних и тех же уравнений, например, система уравнений (3.65) на странице 106 диссертации, записанная для напряженно-деформированного состояния ствола, повторяется в другом виде (3.94) на странице 123 для задачи соударения. Желательно было бы представить все уравнения единообразно.

### **Глава 5**

8. Не приведены конкретные данные о расхождении результатов газодинамического моделирования и экспериментов. При этом для согласования с экспериментальными данными соискатель переходит к использованию термодинамической модели в нульмерной постановке.

Тем не менее, отмеченные недостатки не снижают теоретическую ценность и практическую значимость диссертации.

## **6. Заключение**

Диссертация Суфиянова Вадима Гарайхановича является завершённой научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных исследований решена научная проблема комплексного физико-математического мо-



делирования процесса артиллерийского выстрела для проектирования и отработки артиллерийских систем и имеющая важное хозяйственное значение для развития оборонно-промышленного комплекса.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации, в нем с достаточной полнотой изложены основные идеи и выводы диссертационной работы, степень новизны и практическая значимость результатов исследований.

Диссертационная работа отвечает требованиям п. II «Положения о присуждении ученых степеней» (в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842), а ее автор, Суфиянов В.Г., заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальностям 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (в науке и технике) и 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент

генеральный директор Акционерного общества

«Центральный научно-исследовательский

институт «Буревестник»,

академик РАН,

доктор технических наук, профессор  Г.И. Закаменных

Адрес, включая адрес электронной почты:

Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт «Буревестник», 603950, Россия, г. Нижний Новгород, Сормовское шоссе, 1а  
тел. +7 (831) 241-12-42, e-mail: [mail@burevestnik.com](mailto:mail@burevestnik.com)

Подпись академика РАН, д.т.н., профессора

Г.И. Закаменных заверяю:

Заместитель генерального директора

АО «ЦНИИ «Буревестник»

 Ю.А. Капустин

2017 г.

