

В условиях ускоренного развития информационного общества и информационных технологий, быстро изменяющихся технологических парадигм необходимы новые инструменты, позволяющие повысить производительность и информативность научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ при проектировании и проведении испытаний современных сложных технических систем. Одним из главных инструментов для этого являются современные методы системного анализа, современные компьютерные технологии проектирования и моделирования с применением трехмерных визуальных средств отображения процессов, протекающих в этих системах.

Применение методов системного анализа, основанных на современных компьютерных технологиях, в сочетании с адекватными математическими моделями и эффективными численными методами, позволяет решать новые задачи, такие как, влияние конструкции заряда и формы снаряда при исследовании быстропротекающих процессов артиллерийского выстрела, что имеет важное значение при проектировании новых боеприпасов. В качестве целевой функции рассматривается эффективность действия снаряда у цели.

Комплексное моделирование артиллерийского выстрела включает все этапы движения снаряда по внутри- и внешнебаллистической траектории, а также конечную баллистику и позволяет оценить эффективность функционирования снаряда у цели. В частности, как показано в диссертационной работе Суфиянова В.Г., кинетические характеристики бронебойно-подкалиберных снарядов у цели в значительной степени определяются его конструкцией, которая влияет на массу, дульную скорость и скорость снаряда у цели. Использование комплексных физико-математических моделей артиллерийского выстрела позволяет прогнозировать тактико-технические характеристики разрабатываемых изделий в зависимости от конструкции отдельных его элементов и заложить основу для автоматизированного проектирования артиллерийских систем, сократить число полигонных испытаний.

Работы, выполняемые в рамках диссертационного исследования Суфиянова В.Г., соответствуют приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации “Перспективные виды вооружения, военной и специальной техники” и критической технологии “Базовые и критические военные и промышленные технологии для создания перспективных видов вооружения, военной и специальной техники”.

Таким образом, решение задачи комплексного математического моделирования артиллерийского выстрела с применением визуальных технологий для проектирования и отработки артиллерийских систем является актуальной научной проблемой, имеющей важное значение для военно-промышленной отрасли. Решение этой проблемы позволяет обеспечить выполнение современных требований к эффективности проектирования вооружения и функционирования боеприпасов, повысить информативность и надежность при отработке артиллерийских систем в условиях полигонных испытаний.

Результаты, полученные в диссертации, при решении задачи систематизации комплексного моделирования артиллерийского выстрела для проектирования и отработки артиллерийских систем обладают **научной новизной**. При этом соискателем решены следующие новые задачи:

1. Разработана и реализована комплексная математическая модель процесса артиллерийского выстрела, включающая внутреннюю, внешнюю баллистику и функционирование снаряда у цели.

2. Разработано математическое и алгоритмическое обеспечение, включающее визуализацию, параметрические исследования, имитационное моделирование для системного анализа и оптимизации параметров артиллерийского выстрела и принятия управленческих решений.

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

4. Реализована математическая модель движения снаряда по внешнебаллистической траектории, дополненная расчетом полного набора коэффициентов аэродинамических сил и моментов на основе решения задачи гидродинамического обтекания снаряда и учетом рельефа местности.

5. В составе комплексной модели артиллерийского выстрела реализована математическая модель внутренней баллистики с учетом нестационарного эрозионного выгорания пороховых элементов на основе сопряженной задачи газовой динамики и горения.

6. Разработан численный метод решения задачи внутренней баллистики для различных конструкций заряда в газодинамической постановке и нестационарного эрозионного горения пороха на неравномерной адаптивной сетке.

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

8. Разработана и реализована методика совместного динамического моделирования процессов внутренней баллистики и напряженно-деформированного состояния канала ствола.

9. Разработан численный метод построения и визуализации плотности осколочного поля и области осколочного поражения с учетом рельефа местности на основе имитационного моделирования разлета осколков.

10. Создан проблемно-ориентированный программно-вычислительный комплекс моделирования артиллерийского выстрела и конфигурации полигонных испытаний на основе вычислительного эксперимента.

Научные результаты диссертации достаточно полно опубликованы в 38 печатных работах, среди которых 17 статей в журналах, входящих в перечень ВАК РФ рецензируемых научных изданий и 3 работы, входящих в базу данных Scopus.

Достоверность и обоснованность выводов и практических результатов, полученных в диссертационной работе, подтверждается опытом практической реализации программного комплекса математического моделирования и визуализации различных этапов процесса артиллерийского выстрела, сравнительным анализом с известными результатами современных исследований и разработок, а также результатами сравнения результатов вычислительного и натурного экспериментов. Научно-технические решения, полученные в результате диссертационного исследования, внедрены на испытательном полигоне, которые зафиксированы в акте внедрения. Положительные результаты внедрения также свидетельствуют о достоверности и обоснованности результатов диссертации.

Обоснованность результатов, выносимых на защиту, определяется тем, что автор в качестве методологической основы исследований использовал методы: системного анализа; математического моделирования; вычислительной гидродинамики и механики сплошных сред; теории упругости, пластичности и разрушения; решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений и уравнений в частных производных; статистического имитационного моделирования.

Полученные автором результаты представляют **практическую ценность** для науки и техники. Теоретические и практические результаты диссертационного исследования внедрены в составе программно-аппаратного комплекса автоматизированной системы полигонных испытаний в ФКП «НИИ «Геодезия» при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Внедрение результатов научных и прикладных исследований подтверждено соответствующими актами.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 185 наименований и 4 приложений. Общий объем работы – 315 страниц, включая 179 рисунков и 32 таблицы.

Во введении определены актуальность и степень разработанности темы исследования; сформулированы цель, основные задачи и положения, выносимые на защиту; определены объект и предмет исследования; дана характеристика научной новизны, теоретической и практической значимости результатов, достоверности и обоснованности результатов и выводов, полученных в работе, а также их апробации и публикации в научных изданиях.

В первой главе системно рассмотрены основные этапы процесса моделирования артиллерийского выстрела при проведении полигонных испытаний и визуализации результатов проведения вычислительного эксперимента. Представлена функциональная структура программного комплекса моделирования и визуализации полигонных испытаний.

Во второй главе содержатся результаты разработки виртуальных моделей рельефа, элементов инфраструктуры полигона и объектов испытаний. Представлены трехмерные модели и основные характеристики артиллерийских систем, боеприпасов и измерительно-регистрирующих устройств.

В третьей главе рассматривается комплексная физико-математическая модель процесса артиллерийского выстрела, включающая модели внутрибаллистических процессов в газодинамической постановке с учетом постепенного воспламенения, нестационарного и эрозионного горения порохового заряда; напряженно-деформированного состояния ствола артиллерийского орудия; внешнебаллистических процессов движения снаряда на траектории; процессов бронепробития и разлета осколков. Представлено описание численных методов моделирования исследуемых процессов.

В четвертой главе представлена общая схема программного комплексного моделирования и визуализации полигонных испытаний. Приведено описание структуры базы данных, программных интерфейсов расчетных блоков моделирования внутренней баллистики, внешней баллистики, бронепробития, разлета осколков и блока визуализации полигонных испытаний.

В пятой главе рассмотрены результаты 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. Рассмотрен пример построения аппроксимирующих моделей зависимости внутрибаллистических параметров по результатам численных экспериментов на основе современных методов статистического интеллектуального анализа данных. Решена задача определения напряженно-деформированного состояния ствола артиллерийского орудия с динамическими граничными условиями. Проведено исследование внешнебаллистических траекторий снарядов. Представлены результаты сравнительного анализа траекторий, рассчитанных по стандартной и разработанной методикам. Представлены результаты параметрического исследования влияния конструкции снаряда на глубину бронепробития стальной преграды на основе математического моделирования. Проведено исследование эффективности осколочного действия снарядов в зависимости от высоты подрыва снаряда. Представлены результаты моделирования процесса функционирования измерительно-регистрирующей аппаратуры, методика расчета и визуальные технологии построения зон безопасности на испытательном полигоне.

В заключении приведены основные научные и практические результаты диссертационной работы.

Анализ содержания диссертации позволяет сделать вывод о достижении поставленной цели – повышение информативности и производительности научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ при проектировании и отработке боеприпаса и артиллерийских установок, за счет применения комплексных физико-математических моделей, автоматизации представления результатов вычислительного эксперимента и разработки визуальных технологий сопровождения быстропротекающих процессов различных стадий артиллерийского выстрела.

Диссертационная работа Суфиянова В.Г. выполнена на стыке двух специальностей. Положения, выносимые на защиту, соответствуют пунктам 3, 4, 5, 10 и 12 паспорта специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (в науке и технике) и пунктам 3, 4, 5, 6, 8 паспорта специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации, в нем изложены основные идеи и выводы диссертации, степень новизны и практическая значимость приведенных результатов исследований. Приведенный список публикаций автора отражает основные научные результаты диссертации.

Замечания по диссертации

1. На странице 96 представлена формула преобразования (3.48) для сгущения. Она описана еще в работе П. Роуча (Роуч, П. Вычислительная гидродинамика – М.: Мир, 1980. – 618 с.). Непонятна новизна представленного в диссертации метода сгущения.

2. При моделировании взаимодействия снаряда с преградой используется метод сглаженных гидродинамических частиц. К сожалению, в работе не проведен полноценный обзор сеточных методов решения задачи, а выбран сразу же бессеточный метод.

3. В работе имеются повторяющиеся обозначения для разных характеристик, например m – пористость газопороховой смеси на странице 75 и m – масса снаряда на странице 116. Несмотря на то, что в большинстве случаев это не затрудняет понимание диссертации, было бы желательно использовать различный набор обозначений.

4. В работе рассматривается модель напряженно-деформированного состояния ствола артиллерийского орудия с динамическими граничными условиями. Это часть диссертационной работы рассматривается в качестве отдельной задачи. При комплексном подходе результаты моделирования

должны были бы учитываться в качестве начальных условий, влиять на динамику движения снаряда на внешней траектории и параметры рассеивания снаряда.

5. В четвертой главе представлен в основном интерфейс программного комплекса. Следовало бы более подробно представить связь отдельных блоков моделирования с математическими моделями.

Однако указанные недостатки не носят принципиального характера и могут быть учтены автором в дальнейшей работе.

В целом диссертационная работа Суфиянова В.Г. отличается грамотным использованием математического аппарата в сочетании со сравнительным анализом натуральных экспериментов, хорошо скомпонована и иллюстрирована.

Можно отметить общую *положительную характеристику диссертации* Суфиянова Вадима Гарайхановича по теме: «Решение задачи комплексного моделирования артиллерийского выстрела с применением визуальных технологий для проектирования и отработки артиллерийских систем» и рассматривать ее как завершенную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований решена научная проблема, связанная с применением комплексного моделирования артиллерийского выстрела и визуальных технологий при проектировании и отработке артиллерийских систем, имеющая важное хозяйственное значение.

В работе обоснованы научные положения, выводы и заключения, достоверность и новизна полученных результатов. Некорректных заимствований в рассматриваемой диссертационной работе не выявлено.

Материалы и основные научные результаты диссертационного исследования получены автором самостоятельно, которые в достаточной мере отражены в публикациях в рецензируемых научных изданиях и докладывались на всероссийских и международных научно-технических конференциях. Ре-

зультаты научных исследований получены автором при выполнении прикладных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Диссертационная работа удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней (утверждено Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 в ред. от 02.08.2016г.), которые предъявляются к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Суфиянов Владимир Гарайханович, 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.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании кафедры СМ6 «Ракетные и импульсные системы» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» «_30_»_марта___ 2017 г., протокол №_7_.

Заведующий кафедрой СМ6
«Ракетные и импульсные системы»
ФГБОУ ВО «Московский государственный
технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
член-корреспондент РАН, академик РАРАН,
Заслуженный конструктор РФ

д.т.н., профессор

Валерий Михайлович Кашин

Доцент кафедры СМ6
«Ракетные и импульсные системы»
ФГБОУ ВО «Московский государственный
технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»

Кандидат технических наук



Валерий Николаевич Жураковский

Адрес: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

Тел.: +7 (499) 263-63-91

Email: bauman@bmstu.ru