

*На правах рукописи*



*Суфиянов Вадим Гарайханович*

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ КОМПЛЕКСНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
АРТИЛЛЕРИЙСКОГО ВЫСТРЕЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ ВИЗУАЛЬНЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ОТРАБОТКИ  
АРТИЛЛЕРИЙСКИХ СИСТЕМ

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление  
и обработка информации (в науке и технике)

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Ижевск – 2017

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова».

Научные консультанты: академик РАН, доктор технических наук, профессор,  
**Липанов Алексей Матвеевич**, ИПМ им. М.В. Келдыша  
РАН, главный научный сотрудник;

доктор технических наук, профессор,  
**Русяк Иван Григорьевич**, ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени  
М.Т. Калашникова», заведующий кафедрой  
«Математическое обеспечение информационных систем»

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,  
**Кэрт Борис Эвальдович**, БГТУ «ВОЕНМЕХ»  
им. Д.Ф. Устинова, заведующий кафедрой ЕЗ «Средства  
поражения и боеприпасы»;

доктор технических наук, доцент,  
**Хмельников Евгений Александрович**,  
Нижнетагильский технологический институт (филиал)  
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени  
первого Президента России Б.Н. Ельцина», заведующий  
кафедрой «Специальное машиностроение»;

доктор технических наук, профессор,  
**Закаменных Георгий Иванович**, Акционерное общество  
«Центральный научно-исследовательский институт  
«Буревестник», генеральный директор

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования «Московский  
государственный технический университет имени  
Н.Э. Баумана (национальный исследовательский  
университет)», г. Москва

Защита состоится «08» июня 2017 года в 13 часов на заседании диссертационного совета  
Д 212.065.06 в Ижевском государственном техническом университете имени  
М.Т. Калашникова по адресу 426033, г. Ижевск, ул. 30 лет Победы, 2, 5 корпус ИжГТУ  
имени М.Т. Калашникова.

С диссертацией и авторефератом диссертации можно ознакомиться в библиотеке и на  
сайте ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени  
М.Т. Калашникова», <http://istu.ru>.

Автореферат разослан “\_\_” \_\_\_\_\_ 2017 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просим  
направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по адресу: 426069, г. Ижевск,  
Студенческая, д. 7, ИжГТУ имени М.Т. Калашникова.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент

**В.Н. Сяктерев**

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы исследования.** Создание новых артиллерийских установок, систем стрелково-пушечного вооружения и средств высокоскоростного метания требует проведения значительного объема дорогостоящих экспериментальных исследований и опытных работ. Уменьшить затраты на проведение данных исследований позволяет использование физико-математической модели процесса выстрела, учитывающей последовательность и природу явлений, протекающих в стволе, на траектории и при взаимодействии с объектом поражения. Разработка нового подхода к проектированию артиллерийских систем, связанного с детализацией процессов при артиллерийском выстреле, и эффективных вычислительных алгоритмов в соединении с возможностями современных ЭВМ позволяет ставить методы численного исследования в один ряд с натурными экспериментами. К достоинствам таких исследований следует отнести возможность оптимизации параметров выстрела и повышение тактико-технических характеристик артиллерийских систем на основе имитационных экспериментов. В этой связи, разработка комплексной модели артиллерийского выстрела становится актуальной теоретической и практической задачей.

Комплексные физико-математические модели являются также незаменимым инструментом для анализа нештатных ситуаций, которые возможны при артиллерийском выстреле, и позволяют детально изучать аномальные явления с учетом многих факторов. К аномальным физическим явлениям в процессе артиллерийского выстрела можно отнести существенный рост давления в канале ствола при небольших изменениях исходных параметров заряжания, схемы заряжания или начальных условий выстрела, а также явления, зафиксированные в эксперименте, но не укладывающиеся в устоявшиеся физические представления. Исследование механизмов возникновения данных физических явлений имеет важное значение для снижения объема натурных испытаний на стадии проектирования артиллерийского выстрела.

В настоящее время при моделировании сложных технических систем широкое распространение получают технологии визуального компьютерного моделирования. Применение этих технологий в сочетании с адекватными математическими моделями позволяет исследовать изучаемые процессы в режиме виртуальной реальности, что имеет особое значение, если мы имеем дело с процессами, протекающими с большой скоростью, и надежная регистрация отдельных параметров в ходе натурального эксперимента на данном этапе невозможна. Актуальной научно-практической задачей, в связи с этим, является разработка новых визуальных технологий компьютерного моделирования быстропротекающих процессов.

**Степень разработанности темы исследования.** Современный отечественный уровень исследований в области внутренней баллистики артиллерийских установок определяется научными школами Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова (А.М. Липанов, И.Г. Русяк и др.), Национального исследовательского Томского государственного университета (Ю.П. Хоменко, А.Н. Ищенко, В.З. Касимов и

др.) и Балтийского государственного технического университета «Военмех» им. Д.Ф. Устинова (Б.Э. Кэрт, В.Ф. Захаренков и др.). Широко применяются многопроцессорные вычислительные системы при моделировании внутрикамерных процессов в Институте автоматизации проектирования РАН и Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН коллективом авторов (И.В. Семенов, П.С. Уткин, И.Ф. Ахмедьянов и др.).

Активно проводятся работы по разработке программного обеспечения для решения задач внутренней баллистики в зарубежных странах: США, Франции, Великобритании, Германии, Нидерландах, Финляндии, Японии, Китае и в других странах.

Теоретические основы моделирования внешнебаллистических процессов были заложены учеными Петербургской академии наук Л. Эйлером и основателем русской баллистической школы Н.В. Маиевским. Значительный вклад в изучение различных вопросов внешней баллистики внесли такие выдающиеся ученые, как Н.Е. Жуковский, С.А. Чаплыгин, А.Н. Крылов, Я.М. Шапиро, Д.А. Вентцель, Б.Н. Орлов, В.С. Пугачев. Вопросам разработки программного обеспечения для моделирования внешней баллистики посвящены работы ученых Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова (А.А. Коновалов, Ю.В. Николаев), Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (А.А. Дмитриевский, Л.Н. Лысенко) и др.

В работе рассматриваются задачи моделирования функционирования снаряда бронебойного и осколочного действия, которые основываются на решении задачи напряженно-деформированного состояния. Математическому моделированию и экспериментальным исследованиям действия боеприпасов посвящены работы ученых научных школ Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (В.А. Одинцов, Л.П. Орленко, В.А. Григорян, В.А. Велданов и др.), Новосибирского государственного технического университета (Л.А. Мержиевский, И.А. Балаганский и др.).

Визуальные 3D технологии используются при решении задач имитационного моделирования артиллерийских систем относительно недавно, что обусловлено значительным увеличением возможностей современной вычислительной техники. Проектирование различных элементов артиллерийских систем осуществляется с использованием современных САД систем, например, AutoCAD (Autodesk, Inc., США), Компас-3D (АСКОН, Россия), ПК ЛИРА-САПР (“Лира сервис”, Россия), которые обладают базовыми возможностями математического моделирования элементов конструкций артиллерийских систем. Проведение детальных исследований процесса артиллерийского выстрела проводится в программных комплексах автоматизации инженерного проектирования, таких как ANSYS (ANSYS, США), OpenFOAM (OpenCFD Ltd, Великобритания), ЛОГОС (ФГУП “РФЯЦ-ВНИИЭФ”, Россия), которые используются для моделирования механики сплошных сред и прочностных расчетов.

Современный уровень технологий определяется развитием в том числе и игровой индустрии виртуальной реальности. Эти технологии широко используются для создания систем виртуальной реальности для обучения

действиям в реальных условиях и подготовке боевых операций. Примером использования таких технологий является платформа Virtual Battlespace 3 (Bohemia Interactive®, Чехия), которая используется некоторыми странами НАТО для моделирования боевых действий на суше, в воздухе и на воде. Работы по моделированию боевых ситуаций в виртуальной реальности и управлению боевыми действиями с использованием геоинформационных систем ведутся в Институте исследований систем окружающей среды (ESRI, США).

Информационно-моделирующая среда для поддержки принятия решений и планирования применения оперативно-стратегических, оперативных и тактических формирований ВС РФ разрабатывается в Центре подготовки Сухопутных войск РФ (ОАО «НПО РусБИТех», Россия) совместно с (Rheinmetall AG, Германия). Разрабатываемое ОАО «НПО РусБИТех» программное обеспечение позволяет отображать реальные процессы в режиме виртуальной реальности.

Элементы виртуальной реальности для моделирования фотореалистичных изображений были реализованы при создании стрелкового тренажера в ИжГТУ имени М.Т. Калашникова и ИПМ УрО РАН (А.М. Липанов, Ю.К. Шелковников, А.Ю. Веркиенко и др.).

В ОКБ МЭИ (А.С. Чеботарев, В.Н. Кудряшов, Г.Ф. Гудзь и др.) был разработан аппаратно-программный комплекс «Виртуальный полигон» для обеспечения исследований и определения свойств совокупности объектов системы полигонных испытаний и управления жизненным циклом вооружений, военной и специальной техники.

В отличие от рассмотренного выше программного обеспечения, разработанный в рамках диссертационной работы программный комплекс предназначен для визуализации и моделирования артиллерийского выстрела при проектировании и отработке артиллерийских систем в условиях полигонных испытаний.

**Целью проведения работы** является повышение информативности и производительности научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ на стадии проектирования и отработки 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.

**Объектом исследования** являются система полигонных испытаний и процессы, протекающие при артиллерийском выстреле.

**Предметом исследования** являются визуальные технологии для проектирования и отработки артиллерийских систем в условиях полигонных испытаний и математические модели различных стадий артиллерийского выстрела.

Для достижения указанной цели в диссертации поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработка структурно-функциональной модели визуализации процесса артиллерийского выстрела.

2. Создание геометрических объектов визуального 3D моделирования: артиллерийских установок, снарядов и процессов, протекающих при срабатывании артиллерийского выстрела.
3. Разработка технологии представления различных стадий процесса артиллерийского выстрела с использованием современных визуальных систем 3D моделирования.
4. Разработка комплексной физико-математической модели артиллерийского выстрела, включающей внутреннюю и внешнюю баллистику, а также функционирование снаряда у цели.
5. Разработка эффективных численных алгоритмов решения сопряженной задачи газовой динамики и нестационарного эрозионного горения пороха в условиях артиллерийского выстрела.
6. Построение аппроксимирующих математических моделей по результатам численных экспериментов.
7. Разработка методики и алгоритмов визуализации результатов решения основной задачи внутренней баллистики на основе газодинамической модели воспламенения, эрозионного горения и движения гетерогенных сред для различных конструкций порохового заряда.
8. Разработка методики моделирования и технологии визуализации напряженно-деформированного состояния ствола с учетом динамических граничных условий, полученных в результате решения основной задачи внутренней баллистики.
9. Разработка технологии моделирования и визуального представления траекторий снарядов с учетом рельефа местности при отработке артиллерийских систем.
10. Разработка методологии решения задачи бронепробития снарядом однородных изотропных препятствий и визуальные технологии представления результатов моделирования.
11. Разработка методики статистического имитационного моделирования разлета осколков при подрыве снаряда на траектории и представления результатов моделирования в виде осколочного поля с учетом рельефа местности.
12. Применение разработанных визуальных технологий для определения координат позиционирования и параметров функционирования измерительно-регистрирующей аппаратуры.

**Соответствие темы диссертации требованиям паспорта специальностей ВАК** (по техническим наукам). Диссертационная работа выполнена в соответствии с пунктами 3, 4, 5, 10 и 12 паспорта специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (в науке и технике) и пунктами 3, 4, 5, 6 и 8 паспорта специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ ВАК Министерства образования и науки РФ.

**Научная новизна работы:**

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

2. Разработано новое математическое и алгоритмическое обеспечение, включающее визуализацию, параметрические исследования, имитационное моделирование для системного анализа и оптимизации параметров артиллерийского выстрела и принятия управленческих решений.
3. Впервые 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 впервые реализована математическая модель внутренней баллистики с учетом нестационарного эрозионного выгорания пороховых элементов на основе сопряженной задачи газовой динамики и горения.
6. Реализован численный метод решения сопряженной 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 внутриваллистических параметров по результатам численных экспериментов.
8. Впервые разработана и реализована методика совместного динамического моделирования процессов внутренней баллистики и напряженно-деформированного состояния канала ствола.
9. Разработан новый численный метод построения и визуализации плотности осколочного поля и области осколочного поражения с учетом рельефа местности на основе имитационного моделирования разлета осколков.
10. Впервые создан проблемно-ориентированный программно-вычислительный комплекс моделирования артиллерийского выстрела и конфигурации полигонных испытаний на основе вычислительного эксперимента.

**Теоретическая и практическая значимость** результатов исследования:

1. Расширены возможности системы поддержки принятия решений в задачах баллистического проектирования артиллерийских систем за счет применения комплексной физико-математической модели процесса артиллерийского выстрела.
2. Разработанные визуальные технологии обработки результатов вычислительных экспериментов позволяют повысить информативность и производительность работ при подготовке к проведению полигонных испытаний.
3. Результаты диссертационного исследования внедрены в составе программно-аппаратного комплекса автоматизированной системы полигонных испытаний в ФКП «НИИ «Геодезия» (имеется акт внедрения).

4. Методы и технологии моделирования процесса артиллерийского выстрела, разработанные в ходе диссертационного исследования, используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Ижевский государственный университет имени М.Т. Калашникова» для обучения бакалавров и магистрантов направлений «Прикладная математика» и «Системный анализ и управление» при выполнении лабораторных, курсовых и дипломных работ (имеется акт внедрения).

В целом разработанный комплексный подход к моделированию процесса артиллерийского выстрела и визуальные технологии позволяют обеспечить широкий спектр решения задач баллистического проектирования. Разработанный программный комплекс может применяться как в виде отдельных блоков в научно-исследовательских организациях, занимающихся проектированием ствольных систем и боеприпасов, так и на полигонах при подготовке к проведению натурных баллистических испытаний и для анализа их результатов.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач использовались 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.

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

По специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (в науке и технике):

1. Структурно-функциональная модель системы трехмерной *визуализации и анализа* результатов моделирования процесса артиллерийского выстрела, включающая процессы внутренней, внешней и терминальной баллистики (п. 12).
2. Программно-вычислительный комплекс моделирования и конфигурации полигонных испытаний, включающий *математическое и алгоритмическое обеспечение для анализа, оптимизации* параметров артиллерийского выстрела *и принятия управленческих решений* на основе обработки результатов вычислительного эксперимента (п. 5).
3. 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, предназначенные в качестве *интеллектуальной поддержки и при принятии управленческих решений* для проектирования артиллерийских систем (п. 4, 10) + (п. 3 паспорта специальности 05.13.18).
4. Методика *оптимизации* параметров бронебойно-подкалиберного снаряда на основе комплексного физико-математического моделирования процесса бронепробития с учетом взаимосвязанности объектов «орудие» – «заряд» – «снаряд» – «мишень» и процессов, протекающих при срабатывании артиллерийского выстрела (п. 3, 4).



5. Система *визуализации и анализа* результатов имитационного моделирования измерительно-регистрирующих устройств для *принятия решений* о координатах позиционирования и *оптимизации* параметров функционирования измерительно-регистрирующей аппаратуры при проведении внешнебаллистических траекторных измерений артиллерийских снарядов (п. 5, 12) + (п. 8 паспорта специальности 05.13.18).

По специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ:

6. *Результаты проведения комплексного исследования на основе современных технологий математического моделирования* процессов артиллерийского выстрела, включающего моделирование процессов воспламенения, нестационарного эрозионного горения пороховых элементов, движения пороховых элементов и смеси пороховых газов в стволе артиллерийского орудия, напряженно-деформированного состояния ствола артиллерийского орудия под воздействием переменного давления пороховых газов, движения снаряда по внешнебаллистической траектории, пробития преград артиллерийским бронебойно-подкалиберным снарядом и разлета осколков при подрыве осколочно-фугасного снаряда на траектории (п. 5).

7. *Разработка, обоснование и тестирование эффективного численного метода* решения сопряженной задачи внутренней баллистики в газодинамической постановке и нестационарного эрозионного горения на неравномерной адаптивной сетке и *реализация разработанного численного метода в виде комплекса программ для проведения вычислительного эксперимента* (п. 3, 4).

8. *Реализация численного метода и алгоритма* совместного математического моделирования внутрибаллистических процессов и динамического нагружения ствола артиллерийского орудия *в виде комплекса взаимодействующих программ* расчета внутренней баллистики и напряженно-деформированного состояния (п. 4).

9. *Реализация численного метода и алгоритма* построения зоны поражения на основе имитационного моделирования разлета осколков при подрыве снаряда на траектории *в виде комплекса проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента и проверки адекватности математических моделей на основе данных натурного эксперимента* (п. 4, 6).

10. Система *имитационного моделирования* и визуализации процесса разлета осколков при подрыве осколочно-фугасного снаряда на траектории и построения зон поражения с учетом рельефа местности (п. 8) + (п. 12 паспорта специальности 05.13.01).

**Достоверность и обоснованность** теоретических выводов и практических результатов, полученных в диссертационной работе, подтверждается опытом практической реализации программного комплекса математического моделирования и визуализации различных этапов процесса артиллерийского выстрела, научными трудами и апробациями результатов работы на

представительных научных форумах, а также сравнительным анализом с известными результатами современных исследований и разработок.

Теоретические положения, использованные в работе, математические модели и методы обосновываются адекватностью выбора исходных посылок и последовательным применением аппарата математического моделирования, а также современных апробированных вычислительных технологий для получения численных результатов.

**Внедрение и реализация результатов работы.** Основные научные результаты данной работы получены в рамках выполнения Федеральной целевой программы (утв. Постановление Правительства Российской Федерации от 27.12.12. № 1410-35 «О государственном оборонном заказе на 2013 год и на плановый период 2014 и 2015 годов»), Федеральной целевой программы «Подготовка кадров для инновационной России на период 2014-2016 гг.» и ряда научно-исследовательских работ:

- «Поставка виртуального вычислительного комплекса по баллистике» (Государственный контракт №1 между ГОУ ВПО «ИжГТУ» и НИИ прикладной математики и механики ТГУ, г. Томск, 2012 г.);
- «Исследование механизмов возникновения аномальных физических явлений, сопровождающих процесс артиллерийского выстрела» (грант РФФИ, регистрационный номер НИР 13-01-00691, 2013 г.);
- «Разработка программного обеспечения виртуальной имитационной модели артиллерийского выстрела на основе компьютерных технологий математического моделирования внутрикамерных процессов и движения снаряда на внешнебаллистической траектории, включая особенности взаимодействия боеприпаса с объектом поражения» (ФКП НИИ «Геодезия», 2013-2014 гг.);
- «Моделирование разлета осколков и повышение точности определения зон поражения при срабатывании артиллерийского снаряда с учетом рассеивания характеристик» (ФКП НИИ «Геодезия», 2015 г.);
- «Численное моделирование пространственных нестационарных турбулентных течений гетерогенных реагирующих сред, нестационарного турбулентного обтекания тел сложной формы при больших числах Маха и механики процессов соударения и разрушения при взаимодействии метаемого тела с преградой применительно к процессу артиллерийского выстрела» (Госзаказ № 1.1418.2014/К, 2014- 2016 гг.).

Разработанный программный комплекс визуализации результатов моделирования процесса артиллерийского выстрела используется в составе программно-аппаратного комплекса в ФКП «НИИ «Геодезия» (г. Красноармейск, Московская область) при подготовке проведения полигонных испытаний.

Созданные программные средства позволяют повысить эффективность представления и анализа данных при проведении внутриваллистических, внешнебаллистических и прочностных расчетов.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на 4 международных, 7 всероссийских и региональных научных конференциях: VII международный симпозиум «Фундаментальные и

прикладные проблемы науки» (Россия, Непряхино, Челябинской обл., 11-13 сентября 2012 года); XXIII Всероссийский семинар по струйным, отрывным и нестационарным течениям с международным участием (Россия, г. Томск, 26 - 29 июня 2012 года); 4<sup>th</sup>, 5<sup>th</sup> International Conference on Military Technologies (Чехия, г. Брно, 2013, 2015 гг.); IX, X, XI, XII, XIII Всероссийские научно-технические конференции «Проектирование систем вооружения и измерительных комплексов» (Россия, г. Нижний Тагил, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016 гг.); VII Всероссийская конференция «Внутрикамерные процессы и горение в установках на твердом топливе и ствольных системах» ICOC-2014 (Россия, Москва, 24-26 сентября 2014 года); V Всероссийская научно-техническая конференция «Фундаментальные основы баллистического проектирования – 2016». (Россия, г. Санкт-Петербург, 27 июня – 1 июля 2016 года).

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 38 работах, в 26 статьях, в том числе в 17 статьях в журналах из «Перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов докторских диссертаций», 7 – отчетах о НИР. По результатам работы получено 5 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Личное участие автора** состоит в разработке системного подхода для моделирования взаимосвязанных этапов артиллерийского выстрела, разработке программно-вычислительного комплекса визуализации вычислительных и натурных экспериментов, разработке 3D моделей элементов артиллерийских установок и выстрелов, проведении компьютерного моделирования различных стадий артиллерийского выстрела, включая внутри- и внешнебаллистические процессы, бронепробитие и разлет осколков, построении областей осколочного поражения и зон безопасности.

Автором разработаны описанные в работе методики, реализован комплекс программ для решения поставленных задач. При личном участии автора проводился анализ результатов апробации разработанных методик и визуальных технологий на испытательном полигоне.

**Структура и объём работы.** Объём основного текста диссертации составляет 297 страниц, включая 179 рисунков и 32 таблицы. Работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка сокращений, списка литературы, включающего 185 источников. Кроме того, имеются 4 Приложения объемом 18 страниц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования и степень ее разработанности. Изложены цель проведения работы, объект, предмет и задачи исследования. Представлены научная значимость, теоретическая и практическая полезность работы. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, достоверность и обоснованность теоретических выводов и практических результатов. Указаны внедрение и реализация результатов работы, апробация работы на научных форумах, основные публикации и личное участие автора в проведении диссертационного исследования.

**В первой главе** представлена структурно-функциональная модель системы визуализации процесса артиллерийского выстрела. Представлены результаты структурной декомпозиции виртуальной системы полигонных испытаний, в состав которой входят артиллерийский комплекс, инфраструктура полигона и измерительно-регистрирующий комплекс.

Системно рассмотрены основные этапы процесса моделирования полигонных испытаний и визуализации результатов проведения вычислительного эксперимента. Основные этапы моделирования 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.

Функциональная схема взаимодействия расчетных блоков программного комплекса моделирования представлена на рисунке 1.

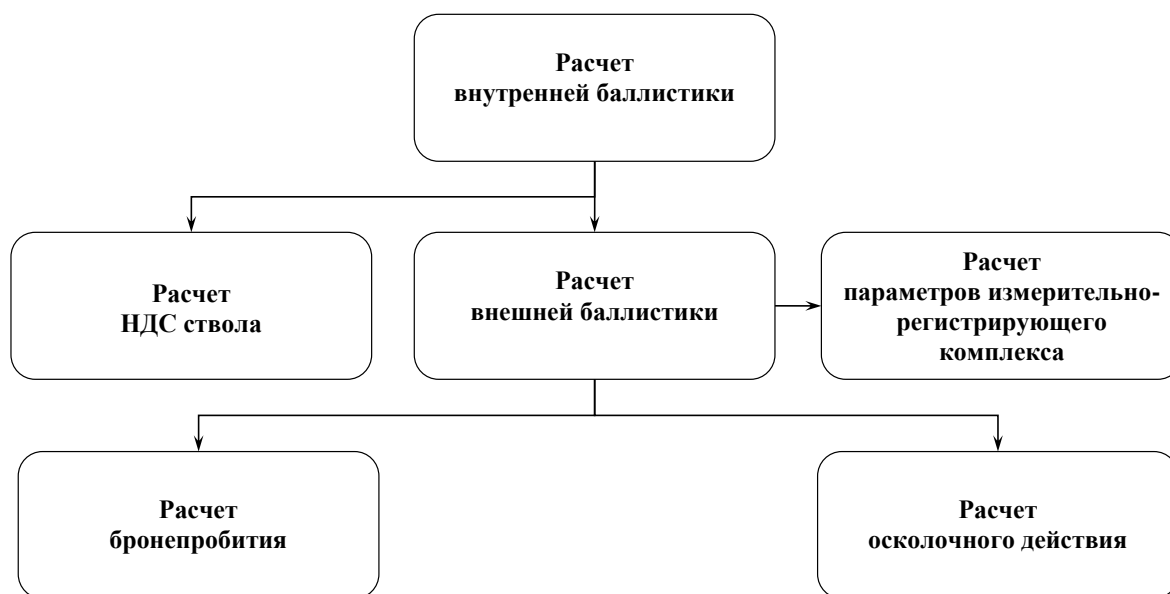


Рисунок 1 – Функциональные зависимости между расчетными блоками программного комплекса

Как видно из представленной на рисунке 1 схемы, первоначально проводится расчет внутренней баллистики. В результате получаем массив данных относительно давления внутри канала ствола. Эти результаты используются в качестве динамических граничных условий для расчета напряженно-деформированного состояния ствола. Результаты расчета внутренней баллистики являются также начальными условиями для вычисления внешнебаллистической траектории движения снаряда.

Моделирование функционирования измерительно-регистрирующего комплекса и расчеты конечной баллистики осуществляются по данным внешнебаллистической траектории движения снаряда.

**Вторая глава** содержит результаты разработки виртуальных моделей рельефа, инфраструктуры полигона и объектов полигонных испытаний.

Рассмотрены вопросы преобразования различных систем координат при создании цифровой карты полигона и технология импорта данных из геоинформационных систем в разрабатываемый программный комплекс.

Представлен механизм привязки виртуальных объектов к цифровой карте полигона (рисунок 2).

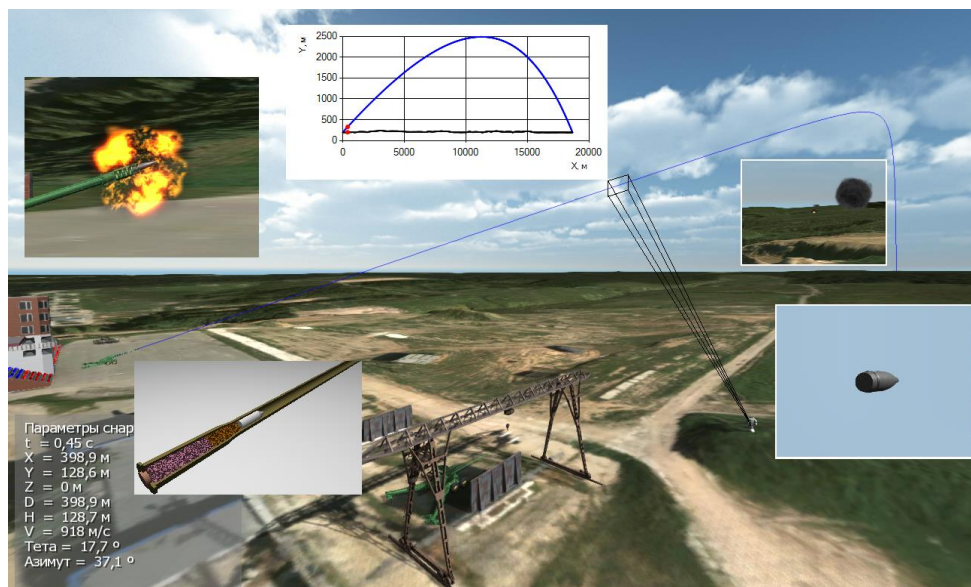


Рисунок 2 – Элементы моделирования системы полигонных испытаний

Разработаны виртуальные модели объектов полигонных испытаний и их составных частей. В работе рассматривается танковое орудие с комплектом бронебойно-подкалиберного и осколочно-фугасного выстрелов, а также гаубичное орудие с комплектом осколочно-фугасного выстрела. Представлены основные технические характеристики артиллерийских комплексов и их составных частей. Созданы виртуальные модели измерительно-регистрирующего комплекса и представлены их технические характеристики.

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

### ***Моделирование внутрибаллистических процессов***

Внутрибаллистические процессы моделируются на основе газодинамической модели движения гетерогенных сред. Рассмотрена основная задача внутренней баллистики для зарядов, состоящих из зерненных и трубчатых пороховых элементов, с учетом их постепенного воспламенения, нестационарного и эрозионного горения<sup>1</sup>. Предполагается, что заряд состоит из двух полузарядов. Индекс  $i = 1$  будем относить к параметрам нижней части заряда (первый полузаряд),  $i = 2$  – верхней части заряда (второй полузаряд).

Продукты горения нижней части заряда будем называть первым компонентом смеси и обозначать индексом 1, верхней части заряда – 2, воздух – 3, газообразные продукты горения воспламенителя – 4, нагретые твердые частицы в продуктах горения воспламенителя – 5.

В рамках принятых в работе допущений, система уравнений внутренней баллистики, описывающая течение многокомпонентной смеси и тепло-массообмен с поверхностью порохового заряда, учитывающая силовое и тепловое взаимодействие с поверхностью канала ствола, имеет вид:

<sup>1</sup> Русяк И.Г., Липанов А.М., Ушаков В.М. Физические основы и газовая динамика горения порохов в артиллерийских системах. – М. Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2016. – 456 с.

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial \rho_i m S}{\partial t} + \frac{\partial \rho_i m S v}{\partial x} = S A_i, \quad i = \overline{1,5}; \\
& \frac{\partial \rho m S v}{\partial t} + \frac{\partial \rho m S v^2}{\partial x} = -m S \frac{\partial p}{\partial x} - S(\tau_{w1} + \tau_{w2}) + S \left( G_1 + G_2 + \sum_{j=1}^3 G_{Bj} \right) w - \\
& \quad - S(G_{51} + G_{52})v - \Pi_c \tau_c; \\
& \frac{\partial \rho m S \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho m S \varepsilon v}{\partial x} = -p \frac{\partial [m S v + (1-m) S w]}{\partial x} + S(\tau_{w1} + \tau_{w2})(v-w) + \\
& + S G_1 \left[ Q_1 + \frac{(v-w)^2}{2} \right] + S G_2 \left[ Q_2 + \frac{(v-w)^2}{2} \right] + \sum_{j=1}^3 S G_{Bj} \left[ Q_{Bj} + \frac{(v-w)^2}{2} \right] - \\
& \quad - S(q_{T1} + q_{T2}) + \Pi_c \tau_c v - \Pi_c q_c; \\
& \quad p(1 - \alpha \rho_r) = (k-1) p \varepsilon,
\end{aligned} \tag{1}$$

где  $t$  – время;  $x$  – координата;  $\rho_1, \rho_2$  – плотности пороховых газов первого и второго полузарядов соответственно;  $\rho_3$  – плотность воздуха;  $\rho_4$  – плотность газов воспламенителя;  $\rho_5$  – плотность накаливаемых твердых частиц в продуктах горения;  $\rho = \sum_{i=1}^5 \rho_i$  – суммарная плотность смеси;  $\rho_r = \sum_{i=1}^4 \rho_i$  – суммарная плотность газов;  $m$  – пористость смеси (объем пустот в единице объема);  $S$  – площадь сечения камеры и ствола;  $v, w$  – скорости движения газа и твердой фазы в канале ствола соответственно;  $p$  – давление;  $\tau_{w1}, \tau_{w2}$  – гидравлические сопротивления трубчатых или зерненных пороховых элементов в единице объема;  $\tau_c$  – сила трения газа о поверхность ствола, приходящаяся на единицу площади;  $\Pi_c$  – периметр канала ствола;  $\varepsilon$  – внутренняя энергия единицы массы пороховых газов;  $Q_1, Q_2$  – теплотворные способности (потенциалы) пороховых элементов первого и второго полузарядов соответственно;  $q_{T1}, q_{T2}, q_c$  – тепловые потоки на поверхность трубчатого и зерненного заряда в довоспламенительный период и на поверхность канала ствола соответственно;  $\alpha = (\alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2) / \rho$  – коволюм смеси пороховых газов;  $\alpha_1, \alpha_2$  – коволюмы для пороховых газов первого и второго полузарядов соответственно;  $A_1 = G_1, A_2 = G_2$  – газоприходы первого и второго полузарядов в единице объема за секунду соответственно;  $A_3 = 0$  (для атмосферного воздуха газоприход отсутствует);  $A_4 = \xi_0 (G_{B1} + G_{B2} + G_{B3})$ ;  $G_{Bj}$  – приход продуктов горения с поверхности горения  $j$ -го воспламенителя в единице объема за секунду ( $j = \overline{1,3}$ );  $Q_{Bj}$  – теплотворная способность  $j$ -го воспламенителя ( $j = \overline{1,3}$ );  $\xi_0$  – массовая доля газовой фазы, поступающей в поток в результате горения воспламенителя;  $A_5 = (1 - \xi_0)(G_{B1} + G_{B2} + G_{B3}) - G_{51} - G_{52}$ ;  $G_{51}, G_{52}$  – масса частиц, улавливаемая в единицу времени пороховыми элементами первого и второго полузарядов соответственно;  $k = \theta + 1$  – показатель адиабаты для смеси

газов;  $\theta = \sum_{i=1}^4 \rho_i R_i / \sum_{i=1}^5 \rho_i c_i$ ;  $c_i$  – теплоемкости газообразных компонентов при постоянном объеме ( $i = \overline{1, 4}$ ) и твердых частиц в продуктах горения воспламенителя ( $i = 5$ );  $R_i$  – газовые постоянные компонентов,  $i = \overline{1, 4}$ .

Законы движения твердой фазы для зерненных и трубчатых порохов описываются различными уравнениями. Пусть индекс  $i$  ( $i = \overline{1, 2}$ ) указывает на область течения, занятую зерненным или трубчатым порохом. Уравнения движения и неразрывности твердой фазы зерненного заряда:

$$\begin{aligned} \frac{\partial a_i S}{\partial t} + \frac{\partial a_i S v}{\partial x} &= 0, \quad m = 1 - a \Lambda_{0i} (1 - \psi_i), \\ \frac{\partial \delta_i (1 - m) S w}{\partial t} + \frac{\partial \delta_i (1 - m) S w^2}{\partial x} &= -(1 - m) S \frac{\partial p}{\partial x} - S G_i w + S \tau_{w_i}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\delta_i$  – плотность материала пороха;  $a_i$  – счетная концентрация зерненных пороховых элементов;  $\Lambda_{0i}$  – начальный объем пороховых элементов;  $\psi_i$  – относительная доля сгоревшего пороха.

Уравнения неразрывности твердой фазы и скорости центра масс трубчатого заряда записываются в виде:

$$\begin{aligned} n_i &= \frac{\omega_i}{\Lambda_{\text{тp}i} L_{0i} \delta_i} = \text{const}, \quad m S = S - n_i \Lambda_{\text{тp}i} (1 - \psi_i), \\ (1 - \bar{\psi}_i) \omega_i \frac{\partial w}{\partial t} &= [(1 - m) S]_0 p_0 - [(1 - m) S]_L p_L + \int_0^{L_{0i}} \left[ p \frac{\partial (1 - m) S}{\partial x} + S \tau_{w_i} \right] dx, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $n_i$  – количество трубчатых пороховых элементов, входящих в  $i$ -й полузаряд;  $\omega_i$  – масса трубчатого заряда;  $L_{0i}$  – длина пороховых трубок; индекс "0" относится к левому концу пороховых трубок, а индекс "L" – к правому;  $\bar{\psi}_i$  – средняя относительная доля сгоревшего пороха в трубчатом заряде;  $\Lambda_{\text{тp}i}$  – начальный объем пороховой трубки.

Уравнение горения пороховых элементов может быть записано в одинаковой форме как для зерненных, так и для трубчатых порохов:

$$\frac{\partial \psi_i}{\partial t} + w \frac{\partial \psi_i}{\partial x} = \frac{\kappa_{pi}}{e_{li}} \sigma_i(\psi_i) u_{ki}, \quad i = \overline{1, 2}, \quad (4)$$

где  $\kappa_{pi}$  – коэффициент формы порохового элемента;  $e_{li}$  – полутолщина горящего свода;  $u_{ki}$  – линейная скорость горения пороха;  $S_{0i}$  – начальная поверхность пороховых элементов;  $\sigma_i(\psi_i)$  – отношение текущей поверхности горения к первоначальной. Для трубчатых порохов:  $\kappa_{pi} = 1$ ,  $\sigma_i(\psi_i) = 1$ .

Уравнение горения воспламенителей принимается в форме:

$$\frac{\partial \psi_{Bj}}{\partial t} + w \frac{\partial \psi_{Bj}}{\partial x} = A_{0j} f(\psi_{Bj}) p^{v_{Bj}}, \quad j = \overline{1, 3}, \quad (5)$$

где  $\psi_{Bj}$  – относительная доля сгоревшего воспламенителя;  $f(\psi_{Bj})$  – функция Шарбонье для зерен воспламенителя;  $A_{0j}, v_{Bj}$  – константы закона скорости горения воспламенителя.

В качестве начальных условий для рассматриваемой системы уравнений задаются атмосферные условия и условия покоя:

при  $t=0, 0 \leq x \leq L_{\text{км}}, v = w = 0, p = p_{\text{н}}, T = T_{\text{н}}, \rho_1 = \rho_2 = \rho_4 = \rho_5 = 0,$

$$\rho_3 = \frac{p_{\text{н}}}{RT_{\text{н}}}, \psi_1 = \psi_2 = 0, \psi_{\text{в1}} = \psi_{\text{в2}} = \psi_{\text{в3}} = 0, \quad (6)$$

где  $L_{\text{км}}$  – длина камеры;  $p_{\text{н}}, T_{\text{н}}$  – начальные давление и температура соответственно;  $R$  – удельная газовая постоянная.

Граничные условия:

при  $x=0, t \geq 0, v = w = 0,$

при  $x = x_{\text{сн}}, t \geq 0, p > p_{\text{ф}}, q \frac{dv_{\text{сн}}}{dt} = S_{\text{сн}}(p_{\text{сн}} - p_{\text{пр}}), \quad (7)$

где  $q$  – масса снаряда;  $p_{\text{сн}}$  – давление на дно снаряда;  $S_{\text{сн}}$  – площадь канала ствола;  $p_{\text{ф}}$  – давление форсирования;  $v_{\text{сн}}$  – скорость снаряда;  $x_{\text{сн}}$  – положение снаряда в канале ствола;  $p_{\text{пр}}$  – давление сжатого воздуха перед снарядом.

В работе представлена схема решения системы уравнений (1)-(7) на основе совместного эйлерово-лагранжева метода.

В предположении нулевого порядка реакции и постоянства теплофизических параметров  $k$ -фазы, а также учитывая, что температурный градиент в глубь пороха значительно превосходит градиент вдоль оси  $x$ , система уравнений, описывающая процесс нестационарного прогрева и последующего горения пороха для твёрдофазной модели, имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial T_k}{\partial t} = \kappa_k \frac{\partial^2 T_k}{\partial y_k^2} + u_k \frac{\partial T_k}{\partial y_k} + \frac{Q_k}{c_k} \Phi_k(T_k), \\ \frac{\partial \beta}{\partial t} = u_k \frac{\partial \beta}{\partial y_k} + \Phi_k(T_k), \end{cases} \quad (8)$$

где  $T_k$  – температура  $k$ -фазы;  $\kappa_k$  – коэффициент теплопроводности  $k$ -фазы;  $y_k$  – координата;  $u_k$  – скорость горения пороха;  $Q_k$  – удельный тепловой эффект химической реакции;  $c_k$  – теплоёмкость  $k$ -вещества;

$\Phi_k(T_k) = Z_k \exp\left(-\frac{E_k}{R_0 T_k}\right)$ ;  $Z_k$  – предэкспонент;  $E_k$  – энергия активации;  $R_0$  –

универсальная газовая постоянная;  $\beta$  – глубина превращения (выгорания)  $k$ -фазы. Уравнения (8) записаны в системе координат, связанной с поверхностью пороха; до воспламенения необходимо положить:  $u_k = 0$ . Условие горения принимается в виде:  $\beta_s = \beta_* = 1$ .

До воспламенения начальные и граничные условия системы (8) имеют вид:

при  $t=0, y_k \geq 0 \quad T_k = T_{\text{н}}, \beta = 0;$



$$\begin{aligned} \text{при } y_k = 0, \quad t \geq 0, \quad & -\lambda_k \frac{\partial T_k}{\partial y_k} = \alpha_T (T - T_s), \quad \beta < \beta_*; \\ \text{при } y_k \geq \infty, \quad t \geq 0, \quad & T_k = T_H \left( \frac{\partial T_k}{\partial y_k} = 0 \right), \quad \beta = 0 \left( \frac{\partial \beta}{\partial y_k} = 0 \right). \end{aligned} \quad (9)$$

После воспламенения на поверхности горения граничные условия:

$$\begin{aligned} \text{при } y_k = 0, \quad t \geq 0, \\ -\lambda_k \frac{\partial T_k}{\partial y_k} \Big|_s = \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_s - (c_p - c_k) \delta u_k T_s + \delta u_k p \left( \frac{1}{\delta} - \alpha \right), \quad T_k = T = T_s, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_s = q_p + q_v$ ;  $q_p$  – тепловой поток, при отсутствии течения газов;  $q_v$  – конвективный тепловой поток, формирующий эрозионную составляющую.

В процессе горения вблизи поверхности пороха наблюдаются высокие значения градиентов температуры и глубины выгорания, поэтому для обеспечения требуемой точности расчета, необходимо вводить расчетную сетку с большим числом разбиений. Кроме того, глубина прогретого слоя в процессе выстрела с ростом давления уменьшается на порядки, что также влияет на точность. В этой связи в работе рассматривается неравномерная адаптированная расчетная сетка, подстраивающейся под глубину прогретого слоя области расчета. Исходя из экспоненциального вида зависимостей  $T_k(y_k, t)$  и  $\beta(y_k, t)$ , было проведено преобразование физической плоскости  $(y_k, t)$  в плоскость  $(\eta_k, t)$  по формуле:

$$y_k = A_k (e^{\eta_k} - 1), \quad (11)$$

где  $A_k$  – параметр сгущения сетки.

Такое преобразование позволяет создать экономичный алгоритм расчета без потери точности в области наиболее резкого изменения функций. Переходя к новой переменной в системе (8) и выбирая в плоскости  $(\eta_k, t)$  равномерный шаг  $h_k$ , получаем сгущение узлов сетки вблизи поверхности горения:

$$h_k = \frac{\ln M}{N}, \quad (12)$$

где  $N$  – число разбиений;  $M$  – отношение наибольшего шага интегрирования к наименьшему в физической плоскости.

Уравнение нелинейной теплопроводности  $k$ -фазы аппроксимировалось по схеме Кранка-Никольсона, обладающей вторым порядком точности по координате и времени.

### **Моделирование напряженно-деформированного состояния ствола**

Результаты решения задачи внутренней баллистики используются для моделирования напряженно-деформированного состояния ствола в процессе артиллерийского выстрела. Методика решения напряженно-деформированного состояния основывается на решении трехмерной системы дифференциальных уравнений в частных производных с динамическими граничными условиями на внутренней поверхности ствола.

Система дифференциальных уравнений напряженно-деформированного состояния ствола состоит из следующих уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} + F_x = \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} + F_y = \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + F_z = \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}, \end{cases} \quad (13)$$

где  $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$  – нормальные напряжения;  $\sigma_{xy}, \sigma_{yx}, \sigma_{yz}, \sigma_{zy}, \sigma_{zx}, \sigma_{xz}$  – тангенциальные напряжения;  $F_x, F_y, F_z$  – проекции объемных сил, отнесенных к единице объема тела;  $u_x, u_y, u_z$  – проекции перемещений на координатные оси  $x, y$  и  $z$  соответственно.

Вторую группу уравнений составляют геометрические соотношения Коши, связывающие коэффициенты линейных  $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$  и тангенциальных  $\varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{zx}, \varepsilon_{yx}, \varepsilon_{zy}, \varepsilon_{xz}$  деформаций с проекциями перемещений  $u_x, u_y, u_z$  на координатные оси.

Проектирование орудий основывается на решении задач, связанных с прочностью под действием различных сил. Наибольшее влияние на конструкцию ствола оказывают поверхностные силы давления пороховых газов. Под воздействием этих сил возникают напряжения, которые приводят к деформации канала ствола.

Физическая модель напряженно-деформированного состояния изотропного тела, связывающая напряжения и деформации тела, описывается обобщенным законом Гука. В теории упругости напряжения и деформации связаны линейным соотношением, справедливым до значения предела упругости. При увеличении деформации зависимость становится нелинейной. В работе использовалась модель пластичности Джонсона–Кука.

Граничные условия задаются внутри канала ствола и на его внешней границе (рисунок 3).

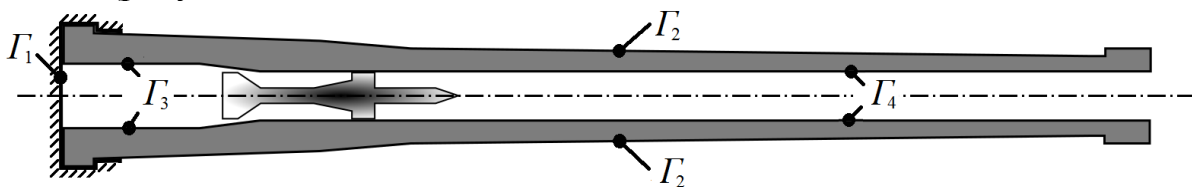


Рисунок 3 – Граничные условия для напряженно-деформированного состояния ствола

Заштрихованная часть соответствует границе закрепления ствола  $\Gamma_1$ . В этой области скорости перемещения равны нулю. На внешней границе ствола  $\Gamma_2$  напряжение соответствует атмосферному давлению  $p_n$ . Внутри канала ствола задаются две области: в области заснарядного пространства  $\Gamma_3$  напряжение обусловлено давлением пороховых газов  $p = p(x, t)$ , вычисленное

на основе решения уравнений внутренней баллистики; в области перед снарядом  $\Gamma_4$  напряжение создается атмосферным давлением  $p_H$ .

Граничные условия определяются из следующих соотношений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_x}{\partial t} \Big|_{\Gamma_1} = 0, \quad \frac{\partial u_y}{\partial t} \Big|_{\Gamma_1} = 0, \quad \frac{\partial u_z}{\partial t} \Big|_{\Gamma_1} = 0, \\ u_x \Big|_{\Gamma_1} = 0, \quad u_y \Big|_{\Gamma_1} = 0, \quad u_z \Big|_{\Gamma_1} = 0, \\ \sigma \Big|_{\Gamma_2} = p_H, \quad \sigma \Big|_{\Gamma_3} = p(x,t), \quad \sigma \Big|_{\Gamma_4} = p_H, \end{aligned} \quad (14)$$

где  $\sigma$  – напряжение, задаваемое по нормали к границе поверхности.

Задача динамического нагружения ствола артиллерийского орудия решается методом конечных элементов в лагранжевой постановке в системе инженерного компьютерного моделирования ANSYS Autodyn.

### **Моделирование внешнебаллистических процессов**

Внешнебаллистические процессы описываются системой дифференциальных уравнений движения твердого тела. Траектория движения снаряда строится в стартовой системе координат  $Oxyz$ . Параметры движения снаряда определяются в траекторной системе координат  $Ox_k y_k z_k$  (рисунок 4).

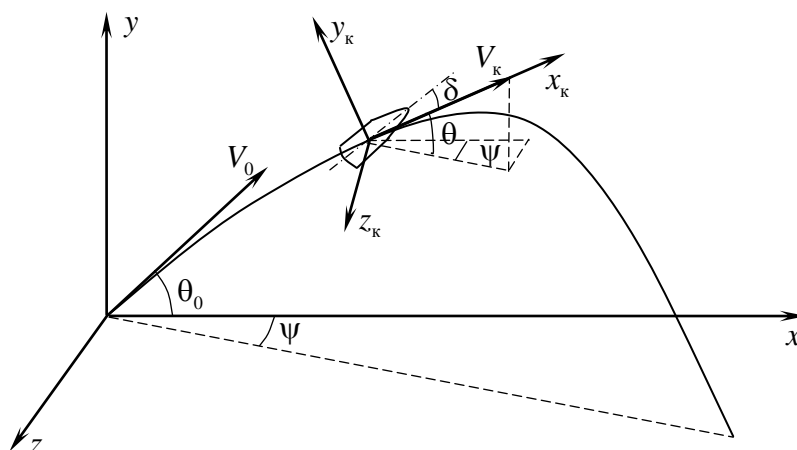


Рисунок 4 – Ориентация траекторной системы координат ( $Ox_k y_k z_k$ ) относительно стартовой ( $Oxyz$ )

Координаты центра масс снаряда определяются уравнениями:

$$\frac{dx}{dt} = V_{пр} \cos \psi, \quad \frac{dy}{dt} = V_k \sin \theta, \quad \frac{dz}{dt} = -V_{пр} \sin \psi, \quad (15)$$

где  $x$  – дальность в плоскости стрельбы;  $y$  – высота полета снаряда;  $z$  – боковое отклонение;  $\theta$  – угол наклона траектории;  $\psi$  – угол пути;  $V_k$  – скорость центра масс снаряда (земная скорость снаряда);  $V_{пр}$  – путевая скорость снаряда, приведенная к поверхности уровня орудия.

Совместно с системой (15) решаются уравнения:

$$\frac{dS}{dt} = V_K, \quad \frac{dV_K}{dt} = -g \sin \theta - \frac{C_{x_k} q S_M}{m}, \quad \frac{d\omega_x}{dt} = -\frac{m_x q S_M l}{I_x} \bar{\omega}_x, \quad (16)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{g \cos \theta}{V_K} - \frac{C_{y_k} q S_M}{m V_K} + \frac{V_K \cos \theta}{R_3 + y} + \Delta \dot{\theta}_3, \quad \frac{d\psi}{dt} = \frac{f_{z_k} I_x \omega_x \dot{\theta}}{l m V_K \cos \theta} - \frac{C_{z_k} q S_M}{m V_K \cos \theta} + \Delta \dot{\psi}_3,$$

где  $S$  – длина пути снаряда;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $C_{x_k}$ ,  $C_{y_k}$ ,  $C_{z_k}$  – коэффициенты составляющих аэродинамической силы по осям траекторной системы координат;  $q$  – скоростной напор воздуха;  $S_M = \pi D^2/4$  – площадь миделева сечения снаряда;  $D$  – калибр снаряда;  $m$  – масса снаряда;  $l$  – длина снаряда;  $R_3$  – радиус Земли при аппроксимации ее шаром;  $\Delta \dot{\theta}_3$  – производная дополнительного угла наклона траектории;  $f_{z_k}$  – коэффициент деривации;  $I_x$  – аксиальный момент инерции снаряда;  $\Delta \dot{\psi}_3$  – производная дополнительного угла пути;  $m_x$  – коэффициент аэродинамического аксиального демпфирующего момента (момента трения);  $\omega_x$  – аксиальная угловая скорость;  $\bar{\omega}_x$  – безразмерное представление аксиальной угловой скорости.

Колебания снаряда относительно центра масс определяются пространственным углом нутации  $\delta$  и аксиальной угловой скоростью  $\omega_x$ , составляющие которых описываются системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d\delta_1}{dt} = \frac{\omega_1 - \dot{\psi} \cos(\theta + \delta_2) - \dot{\theta} \delta_1 \delta_2}{\cos \delta_2}, & \frac{d\omega_1}{dt} = \frac{m_1 q S_M l - I_x \omega_x \omega_2}{I_z}, \\ \frac{d\delta_2}{dt} = \omega_2 - \dot{\psi} \sin \theta \delta_1 - \dot{\theta} \cos \delta_1, & \frac{d\omega_2}{dt} = \frac{m_2 q S_M l + I_x \omega_x \omega_1}{I_z}, \end{cases}$$

где  $\delta_1, \delta_2$  – горизонтальная и вертикальная составляющие угла нутации;  $\omega_1, \omega_2$  – горизонтальная и вертикальная составляющие экваториальной угловой скорости;  $m_1, m_2$  – коэффициенты составляющих аэродинамического момента;  $I_z$  – экваториальный центральный момент инерции снаряда.

В отличие от стандартных методов, основанных на эталонных зависимостях для коэффициентов лобового сопротивления, в работе расчет траектории снарядов проводился с использованием расчетных аппроксимационных зависимостей для коэффициентов аэродинамических сил и моментов, определенных из решения задачи гидродинамического обтекания снаряда:

$$\begin{cases} C_{x_k} = C_x^a(M, \alpha_{\Pi}), & m_x = m_x^a(M, \bar{\omega}_x), \\ C_{y_k} = -C_y^a(M, \alpha_2) + C_z^a(\bar{\omega}_x, \alpha_1), & m_1 = m_z^a(M, \alpha_1) + m_y^a(M, \alpha_2, \bar{\omega}_x), \\ C_{z_k} = -C_y^a(M, \alpha_1) - C_z^a(\bar{\omega}_x, \alpha_2), & m_2 = m_z^a(M, \alpha_2) - m_y^a(M, \alpha_1, \bar{\omega}_x), \end{cases} \quad (17)$$

где  $\alpha_{\Pi} = \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2}$  – пространственный угол атаки;  $\alpha_1, \alpha_2$  – горизонтальная и вертикальная составляющие угла атаки;  $C_x^a(M, \alpha)$ ,  $C_y^a(M, \alpha)$ ,  $C_z^a(\bar{\omega}_x, \alpha)$  – расчетные аппроксимационные зависимости коэффициентов силы

сопротивления;  $m_x^a(M, \bar{\omega}_x)$ ,  $m_y^a(M, \alpha, \bar{\omega}_x)$ ,  $m_z^a(M, \alpha)$  – расчетные аппроксимационные зависимости коэффициентов моментов аэродинамической силы.

Методика решения задачи основывается на методе Рунге-Кутты 6-го порядка точности аппроксимации с контролем погрешности интегрирования.

### **Моделирование процесса бронепробития**

На заключительном этапе моделирования рассматриваются процессы конечной баллистики: бронепробития и разлета осколков. Задача бронепробития (рисунок 5) рассматривается на основе соотношений, описывающих движение сжимаемой упругопластической среды, которые базируются на законах сохранения массы, импульса и энергии и замыкаются соотношениями Прандтля–Рейсса при условии текучести Мизеса.

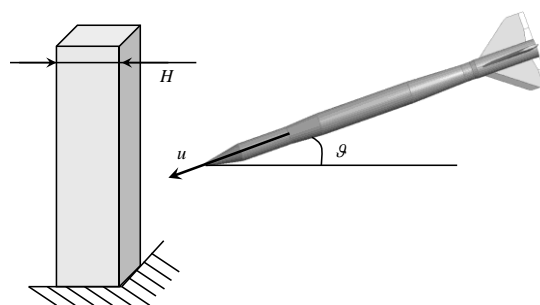


Рисунок 5 – Схема динамического взаимодействия снаряда с преградой

Законы сохранения импульса, массы и энергии записываются в виде:

$$\frac{d\dot{i}_\alpha}{dt} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{\alpha\beta}}{\partial x_\beta} = 0, \quad \frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{\partial \dot{i}_\alpha}{\partial x_\alpha} = 0, \quad \frac{dE}{dt} = \frac{1}{\rho} \sigma_{\alpha\beta} \dot{\epsilon}_{\alpha\beta}, \quad (18)$$

где  $\rho$  – плотность;  $\dot{i}_\alpha$  – компоненты скорости деформации;  $\sigma_{\alpha\beta}$  – компоненты тензора напряжений;  $\dot{\epsilon}_{\alpha\beta}$  – компоненты тензора скоростей деформации;  $E$  – внутренняя энергия;  $x_\alpha$  и  $x_\beta$  – составляющие вектора координат;  $\alpha, \beta$  – индексы координатного вектора,  $\alpha, \beta \in \{x, y, z\}$ .

В качестве уравнения состояния моделируемой среды использовано уравнение состояния EOS Shock (Equation Of State Shock):

$$p = p_n + \Gamma \rho (E - E_n), \quad (19)$$

где  $p$  – полное давление системы;  $p_n$  – давление в начальном состоянии;  $\Gamma$  – коэффициент Грюнайзена в текущий момент времени;  $\rho$  – плотность материала;  $E_n$  – внутренняя энергия в начальном состоянии.

Предел текучести определяется моделью Джонсона–Кука.

Решение осуществляется на основе метода сглаженных гидродинамических частиц (SPH) в программе ANSYS Autodyn.

### **Моделирование осколочного действия**

В работе предложен алгоритм построения зон поражения с учетом рельефа местности на основе многократного моделирования разлета осколков. Алгоритм решения задачи разлета осколков при срабатывании снаряда и построения зон поражения состоит из 6 этапов:

1. Задание точки вылета снаряда из артиллерийского орудия и времени подрыва.
2. Определение положения снаряда, направления и скорости движения снаряда в точке срабатывания заряда.

3. Расчет распределения массы осколков на основе статистической модели разрушения снаряда.
4. Расчет начальной скорости осколков относительно снаряда, начального положения и направления движения осколков.
5. Расчет траектории движения осколков на основе уравнения движения.
6. Расчет плотности осколочного потока и зон поражения на основе рассчитанных траекторий движения осколков.

Траектория снаряда рассчитывается в плоскости стрельбы по формулам (15)-(17) и преобразуется в земную систему координат. В момент срабатывания снаряда определяются его положение в стартовой системе координат, вектор скорости снаряда, угол наклона траектории и угол пути.

Плотность распределения осколков по массе описывается бимодальным гипервейбулловским законом:

$$f(m) = \frac{1}{\langle m \rangle} \left\{ \xi \alpha \left( \frac{m}{m_a} \right)^\alpha \exp \left[ - \left( \frac{m}{m_a} \right)^\alpha \right] + (1 - \xi) \beta \left( \frac{m}{m_b} \right)^\beta \exp \left[ - \left( \frac{m}{m_b} \right)^\beta \right] \right\},$$

где  $\langle m \rangle$  – математическое ожидание массы осколка;  $m_a, m_b, \alpha, \beta$  – характеристические массы и показатели качества основного и сопутствующего спектра;  $\xi$  – коэффициент, устанавливающий соотношение частей спектра.

Для расчета начального положения осколков вводятся ряд допущений: снаряд имеет осесимметричный вид; массы осколков не зависят от их расположения на снаряде; начальные скорости осколков одинаковы; угол в меридиональной плоскости зависит от положения осколка по длине снаряда.

С учетом рассматриваемых допущений начальные скорости осколков, без учета движения снаряда, рассчитывались на основе законов сохранения энергии, углы в экваториальной плоскости моделировались равномерно на отрезке  $[0, 2\pi]$ , положение осколков вдоль оси снаряда моделировалось равномерно на отрезке  $[0, L]$ , где  $L$  – длина снаряда, углы в меридиональных плоскостях  $\varphi = \varphi(x)$  вычислялись в зависимости от положения осколка.

Полученные значения массы, скорости и углов разлета оболочки являются начальными условиями для дальнейшего расчета движения осколков.

Уравнения движения осколка имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{du_x}{dt} &= - \frac{\Phi c_d (|\mathbf{u} - \mathbf{w}|)}{2m_s^{1/3} \rho_M^{2/3}} \rho |\mathbf{u} - \mathbf{w}| (u_x - w_x), \\ \frac{du_y}{dt} &= - \frac{\Phi c_d (|\mathbf{u} - \mathbf{w}|)}{2m_s^{1/3} \rho_M^{2/3}} \rho |\mathbf{u} - \mathbf{w}| (u_y - w_y) - g, \\ \frac{du_z}{dt} &= - \frac{\Phi c_d (|\mathbf{u} - \mathbf{w}|)}{2m_s^{1/3} \rho_M^{2/3}} \rho |\mathbf{u} - \mathbf{w}| (u_z - w_z), \\ \frac{dx}{dt} &= u_x, \quad \frac{dy}{dt} = u_y, \quad \frac{dz}{dt} = u_z, \end{aligned} \tag{21}$$

начальные условия при  $t = 0$ :

$$\begin{aligned} x(0) &= X_k, y(0) = Y_k, z(0) = Z_k, \\ u_x(0) &= (u_{\max} \sin \varphi + \Omega_k R_0 \sin \varphi \cos \Theta_k) \cos \vartheta + V_x, \\ u_y(0) &= u_{\max} \cos \varphi - \Omega_k R_0 \sin \varphi \cos \Theta_k + V_y, \\ u_z(0) &= (u_{\max} \sin \varphi + \Omega_k R_0 \cos \varphi) \sin \vartheta + V_z, \end{aligned} \quad (22)$$

где  $X_k, Y_k, Z_k$  – координаты точки взрыва;  $\varphi, \vartheta$  – сферические координаты, определяющие направление движения осколка в меридиональных и экваториальных плоскостях соответственно:  $\varphi \in [0, \pi]$ ,  $\vartheta \in [0, 2\pi]$ ;  $\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z)$  – вектор скорости осколков;  $\mathbf{w} = (w_x, w_y, w_z)$  – скорость ветра;  $\Phi$  – параметр формы осколка;  $\Theta_k$  – угол наклона траектории снаряда в точке подрыва;  $\rho$  – плотность воздуха;  $m_s, \rho_M$  – масса и плотность материала осколка;  $c_d(u)$  – коэффициент лобового сопротивления в зависимости от скорости движения;  $u_{\max}$  – максимальная скорость разлета осколков; и  $R_0$  – начальный внешний радиус снаряда;  $\Omega_k$  – угловая скорость вращения снаряда в момент взрыва;  $\mathbf{V} = (V_x, V_y, V_z)$  – скорость снаряда.

Система дифференциальных уравнений (21) с начальными условиями (22) решается методом Рунге-Кутты 6-го порядка. В результате решения получаем траектории движения осколков.

Окончание расчета определяется при выполнении одного из условий:

$$\frac{m_i u_i^2(t)}{2} \leq W_{\text{кр}} \text{ или } y_i(t) \leq H(x_i(t), z_i(t)), \quad i = 1, \dots, n,$$

где  $u_i(t)$  – скорость  $i$ -го осколка в момент времени  $t$ ;  $W_{\text{кр}} = 100 \text{ Дж}$  – минимальная убойная энергия осколка;  $y_i(t)$  – высота  $i$ -го осколка в момент времени  $t$ ;  $H(x_i(t), z_i(t))$  – уровень поверхности земли на траектории движения осколка в момент времени  $t$ .

В работе предложен алгоритм определения плотности осколочного потока и построения области осколочного поражения на основе многократного моделирования разлета осколков и определения точек падения осколков (рисунок 6).

**В четвертой главе** приведено описание программного комплекса моделирования и визуализации полигонных испытаний.

Моделирование полигонных испытаний артиллерийских систем осуществляется в расчетных модулях: внутренней баллистики, внешней баллистики, функционирования снаряда у цели и измерительной аппаратуры.

Расчетные модули создавались в различных средах разработки программных комплексов. Программа расчета внутренней баллистики написана в среде Qt Creator на языке C++. Программа расчета траектории снаряда написана в среде MS Visual Studio 2010 на языке C#. Расчет напряженно-деформированного состояния ствола артиллерийского орудия и взаимодействия

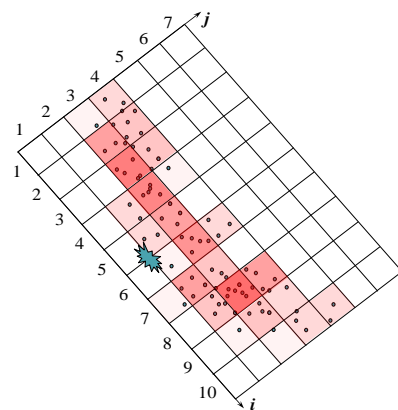


Рисунок 6 – Область поражения после срабатывания снаряда

снаряда с преградой осуществлялся в среде компьютерного инженерного моделирования ANSYS Autodyn.

Программный комплекс конфигурации и визуализации полигонных испытаний создан с использованием среды разработки 3D приложений NeoAxis Engine в MS Visual Studio 2010 на языке C#.

Расчетные данные передаются в программный комплекс визуализации. Данные хранятся в атрибутивной базе данных программного комплекса. База данных представляет собой набор каталогов, в которых содержится графическая информация об артиллерийских установках, выстрелах, объектах поражения и инфраструктуры. Информация о географических координатах и карте местности содержится в отдельном каталоге.

Структура программно-вычислительного комплекса моделирования и визуализации полигонных испытаний представлена на рисунке 7.

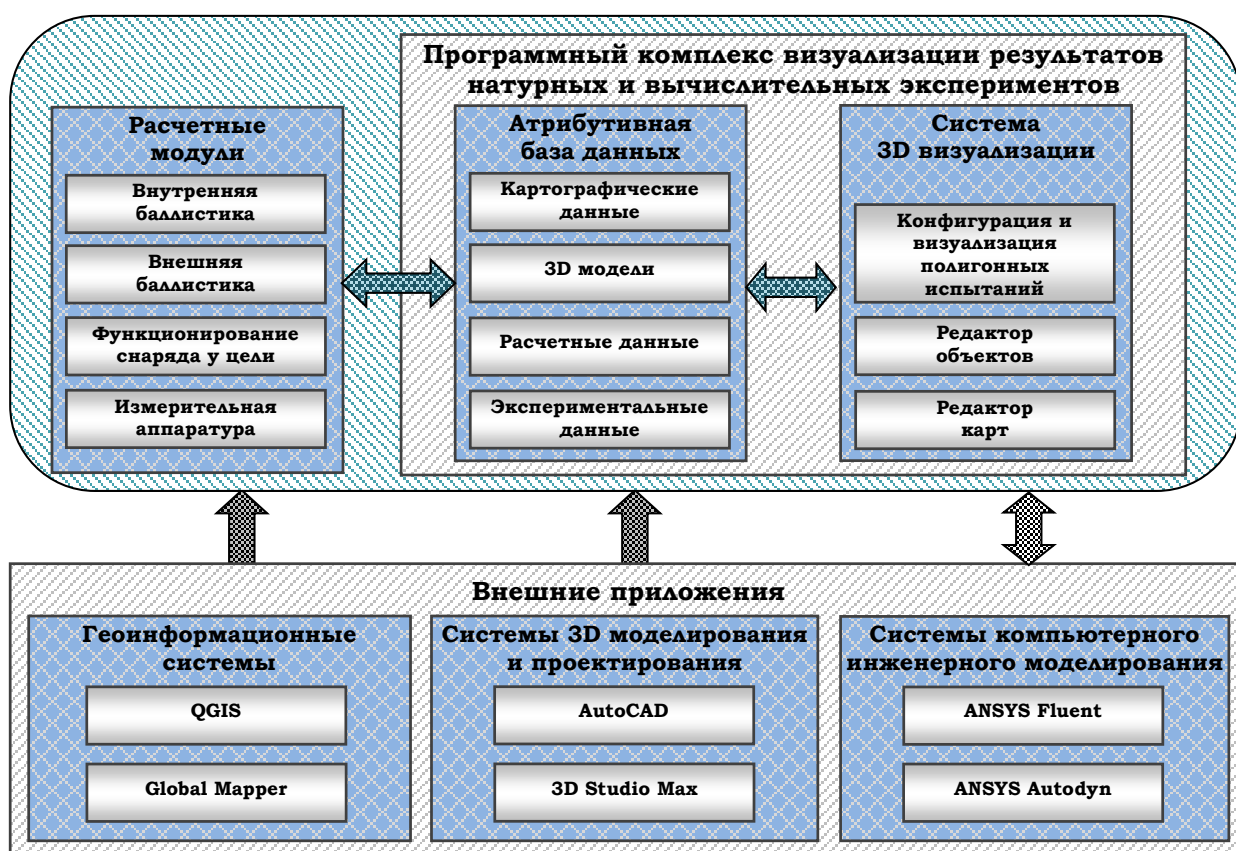


Рисунок 7 – Структура программно-вычислительного комплекса моделирования полигонных испытаний

Разработанный программно-вычислительный комплекс, как видно из представленной структуры (см. рисунок 7), имеет открытую архитектуру и позволяет взаимодействовать с внешними приложениями.

Расчетный блок внутренней баллистики позволяет моделировать и визуализировать процесс выстрела внутри ствола артиллерийского орудия. В работе описывается пользовательский интерфейс и возможности расчетного блока. Результаты моделирования внутренней баллистики представлены в табличном и графическом виде (рисунок 8).



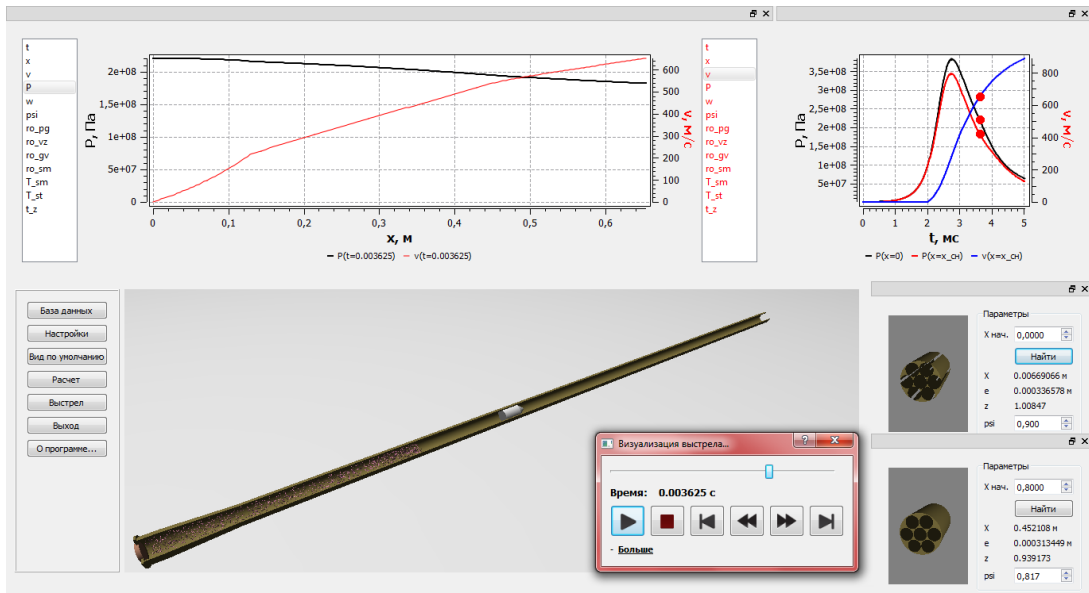


Рисунок 8 – Окно 3D визуализации внутриваллистрического процесса

В блоке расчета внешнебаллистических траекторий снарядов реализованы следующие основные функциональные возможности: решение прямой задачи внешней баллистики, решение обратной задачи внешней баллистики, вычисление разброса снарядов, построение зон безопасности и др.

Расчетный блок моделирования осколочного действия снаряда предназначен для расчета траекторий осколков и построения области осколочного поражения.

Результаты моделирования расчетных блоков передаются в файлы и импортируются в программный комплекс конфигурации и визуализации полигонных испытаний (рисунок 9).

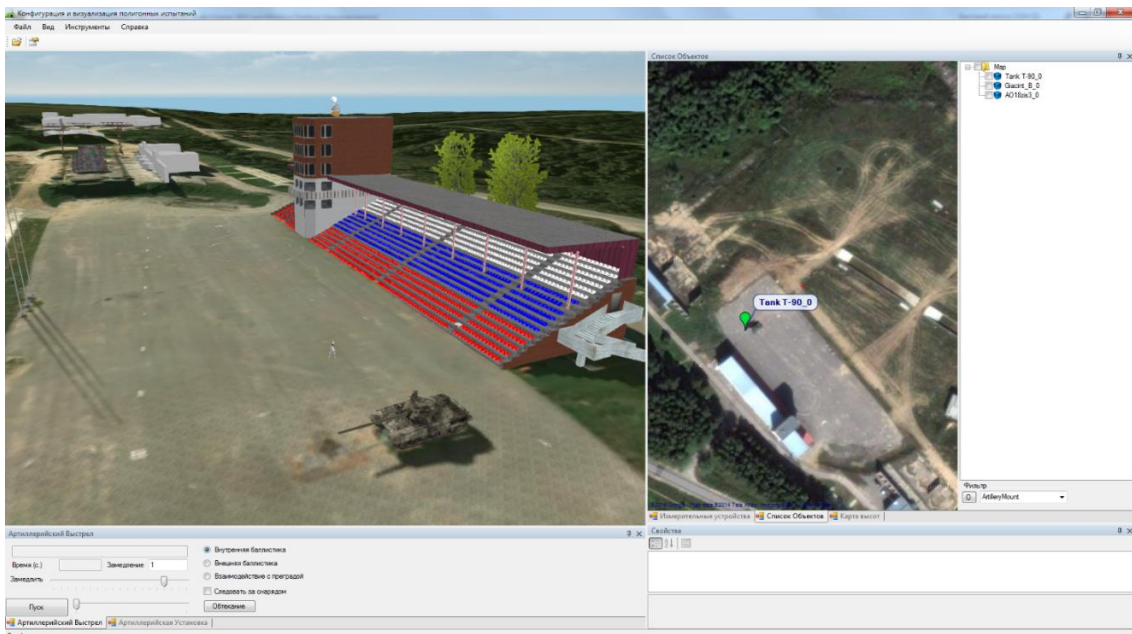


Рисунок 9 – Основное окно программного комплекса конфигурации и визуализации полигонных испытаний

В работе описываются интерфейс и функциональные возможности программного комплекса. Представлена структура классов, предназначенных для моделирования и визуализации объектов полигонных испытаний.

В пятой главе представлены результаты применения компьютерного визуального моделирования для решения задач проектирования и отработки артиллерийских систем при полигонных испытаниях.

### *Результаты моделирования внутренней баллистики*

В работе приведены результаты моделирования внутрибаллистических параметров выстрела для рассматриваемых артиллерийских систем.

При исследовании сходимости метода решения задачи горения расчеты проводились на четырех типах сеток: равномерной, равномерной с адаптацией расчетной области под глубину прогретого слоя, неравномерной и неравномерной с адаптацией расчетной области под глубину прогретого слоя. Размер расчетной области адаптировали к глубине прогретого слоя. При этом расширение области расчета производилось в момент, когда температура пороха в предпоследней ячейке превышала значение  $T_n + \Delta T$ . Сужение области происходило аналогично. При изменении размеров области расчета новые сеточные функции определялись интерполированием с использованием кубических сплайнов.

На основании исследования сеточной сходимости при моделировании процесса нестационарного эрозионного горения пороха можно сделать вывод о том, что равномерная сетка не обеспечивает приемлемой точности расчета скорости горения. При числе разбиений  $N=100$  для равномерной сетки погрешность составила  $\varepsilon=19,1\%$ , равномерной адаптивной –  $\varepsilon=2,0\%$ , неравномерной –  $\varepsilon=1,1\%$ , в то время как для неравномерной адаптивной сетки уже при  $N=10$  погрешность составляет  $\varepsilon=0,8\%$ .

Определены максимальные значения давления и дульной скорости, представлены графики изменения давления на дно канала установки, дно снаряда и скорости снаряда от времени, а также эпюры максимальных давлений и температур смеси газов. Результаты тестирования показали, что максимальное давление внутри ствола и дульная скорость снарядов удовлетворительно совпадают с номинальными значениями.

Сравнительный анализ результатов моделирования ОФ 125 мм снаряда с данными натурального эксперимента представлен на рисунке 10.

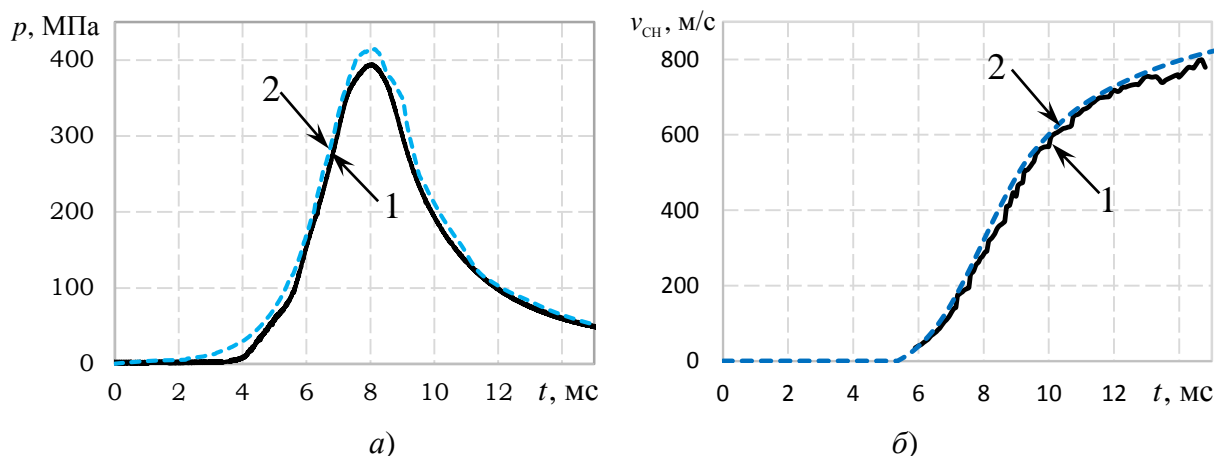


Рисунок 10 – Сравнение давлений внутри ствола (а) и скоростей снаряда (б) в процессе выстрела для 125 мм ОФ снаряда: 1 – эксперимент, 2 – расчет

Результаты сравнительного анализа показали, что погрешность по максимальному давлению внутри ствола составила 4,8%, а по дульной скорости – менее 1%.

Численное решение сопряженной задачи движения комбинированного заряда в смеси пороховых газов (1) – (7) и нестационарного эрозионного горения (8) – (10) сопряжено с большими затратами времени. В диссертации рассмотрен пример понижения размерности математических моделей, воспроизводящий характеристики процессов внутренней баллистики с небольшими временными затратами на примере термодинамической модели:

$$\begin{cases} W \frac{dp}{dt} = \frac{kR}{1-\alpha\rho} M(\chi T_p - T) + \frac{kp}{\rho(1-\varepsilon\rho)} \left[ M \left( 1 - \frac{\rho}{\delta} \right) - S_{\text{сн}} v_{\text{сн}} \rho_{\text{сн}} \right], \\ \frac{Wp}{T} \frac{dT}{dt} = \frac{kR}{1-\alpha\rho} M(\chi T_p - T) + \frac{\theta p}{\rho(1-\varepsilon\rho)} \left[ M \left( 1 - \frac{\rho}{\delta} \right) - S_{\text{сн}} v_{\text{сн}} \rho_{\text{сн}} \right], \\ \frac{de}{dt} = u, \quad \frac{dW}{dt} = S_{\text{сн}} v_{\text{сн}} + \frac{M}{\delta}, \end{cases} \quad (23)$$

где  $p$  – давление;  $\rho$  – плотность газа;  $k$  – показатель адиабаты;  $\alpha$  – коволюм;  $W$  – свободный объем камеры и ствола;  $T_p$  – изобарная температура;  $\chi$  – коэффициент тепловых потерь;  $S_{\text{сн}}$  – площадь канала ствола;  $v_{\text{сн}}$  – скорость снаряда;  $\rho_{\text{сн}}$  – плотность за снарядом, связанная с давлением на дно снаряда  $p_{\text{сн}}$  в заснарядном пространстве;  $M = \delta u \Sigma(e)$  – газоприход продуктов сгорания;  $\Sigma(e)$  – зависимость площади поверхности горения от толщины сгоревшего свода  $e$ ;  $\delta$  – плотность материала пороха;  $u$  – скорость горения пороха определяется зависимостью  $u = u_1 p$ ;  $u_1$  – единичная скорость горения пороха.

Система уравнений (23) решается численно методом Рунге-Кутты.

Введем в рассмотрение вектор корректирующих функций  $\Phi = (\varphi_{\Sigma}(e), \varphi_{\chi}(t), \varphi_{\text{сн}}(t), \varphi_u(e))^T$ , отвечающих за приближение модели (23) к математической модели (1) – (10):

$$\begin{aligned} \Sigma = \varphi_{\Sigma} \Sigma_0 + \Sigma_{\text{в}}, \quad \chi = \chi_0 \varphi_{\chi}, \quad p_{\text{сн}} = \frac{p \varphi_{\text{сн}} - \frac{\omega \Theta (1 - f_1(\bar{x})) v_{\text{сн}}^2}{2 W_k \bar{x}}}{1 + \frac{\omega}{2q} f_1(\bar{x})}, \quad u = u_1 \varphi_u p, \\ \Sigma_0 = \frac{\omega}{\delta e_k}, \quad \Sigma_{\text{в}} = \frac{6\omega_{\text{в}}}{\delta_{\text{в}} D_{\text{в}}} \left( 1 - \frac{2e_{\text{в}}}{D_{\text{в}}} \right)^2, \quad \Theta = \frac{S_k}{S_{\text{сн}}}, \quad f_1(\bar{x}) = \frac{\Theta^2 - 1}{(\Theta + \bar{x})^2}, \quad \bar{x} = \frac{x_{\text{сн}} + L_k}{L_k}, \end{aligned} \quad (24)$$

где  $\omega$  – масса заряда;  $e_k$  – толщина свода порохового элемента;  $\Sigma_{\text{в}}(e_{\text{в}})$  – площадь поверхности горения воспламенителя в зависимости от толщины сгоревшего свода воспламенителя  $e_{\text{в}}$ ;  $\omega_{\text{в}}, \delta_{\text{в}}, D_{\text{в}}$  – масса, плотность, диаметр частиц воспламенителя;  $\chi_0 = 0,9$  – характерное значение тепловых потерь;  $W_k = S_k L_k$  – объем камеры сгорания;  $S_k, L_k$  – площадь сечения и длина камеры сгорания;  $x_{\text{сн}}$  – путь снаряда в канале ствола.

Для определения функций  $\Phi$  используются соответствующие зависимости  $P(t) \Leftrightarrow p(t)$ ,  $P_{\text{сн}}(t) \Leftrightarrow p_{\text{сн}}(t)$ ,  $V_{\text{сн}}(t) \Leftrightarrow v_{\text{сн}}(t)$ , полученные из численного решения уравнений (1) – (10). Функции  $\Phi$  должны обеспечивать минимальные значения отклонений переменных  $p(t)$ ,  $p_{\text{сн}}(t)$ ,  $v_{\text{сн}}(t)$  от значений  $P(t)$ ,  $P_{\text{сн}}(t)$ ,  $V_{\text{сн}}(t)$  за время выстрела  $t_k$ :

$$\begin{cases} J_p(\Phi) = \int_0^{t_k} [p(t) - P(t)]^2 dt \rightarrow \min_{\Phi}, \\ J_c(\Phi) = \int_0^{t_k} [p_{\text{сн}}(t) - P_{\text{сн}}(t)]^2 dt \rightarrow \min_{\Phi}, \\ J_v(\Phi) = \int_0^{t_k} [v_{\text{сн}}(t) - V_{\text{сн}}(t)]^2 dt \rightarrow \min_{\Phi}. \end{cases} \quad (25)$$

Задача многокритериальной оптимизации (25) решалась с применением гибридного генетического алгоритма с вещественным кодированием. Отбор для скрещивания проводится турнирным методом. Полученное решение является однозначным и оптимальным по Парето.

Результаты построения аппроксимирующих математических моделей по результатам численных экспериментов представлены для 152 мм ОФ снаряда.

На рисунке 11 точками представлены зависимости осредненного давления и давления на дно снаряда  $P(t), P_{\text{сн}}(t)$ , полученные из численного решения задачи (1) – (10) и используемые в качестве эталонных для подбора корректирующих функций  $\Phi$ . На этом же рисунке линиями представлены зависимости  $p(t), p_{\text{сн}}(t)$ , рассчитанные по уравнениям (23) с учетом корректирующих функций. Изменение корректирующих функций показано на рисунке 12:

$\varphi_{\Sigma}\left(\frac{e}{e_k}\right)$  – зависимость 1;  $\varphi_{\chi}\left(\frac{t}{t_k}\right)$  – 2;  $\varphi_{\text{сн}}\left(\frac{t}{t_k}\right)$  – 3;  $\varphi_u\left(\frac{e}{e_k}\right)$  – 4.

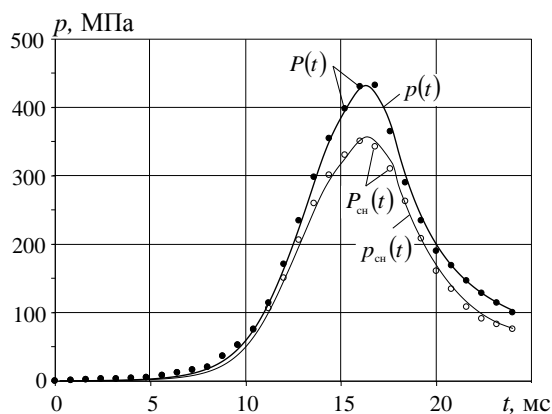


Рисунок 11 – Кривые осредненного давления и давления на дно снаряда

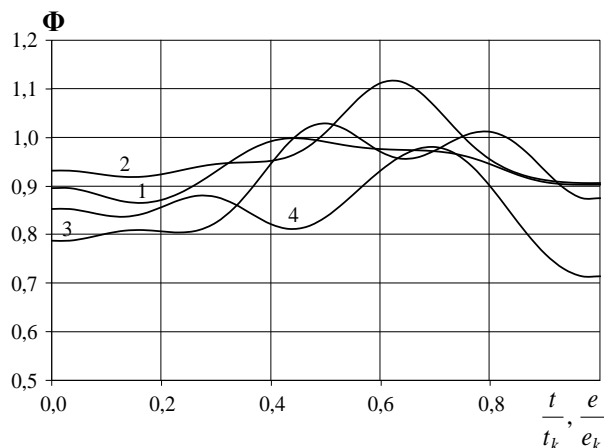


Рисунок 12 – Кривые корректирующих функций

Как видно из представленных на рисунке 11 результатов, подбор корректирующих функций обеспечивает воспроизведение процесса выстрела.

Рассмотрим следующий уровень понижения размерности математической модели аппроксимации точечных характеристик артиллерийского выстрела – максимального давления  $p^{\max}$  в камере и дульной скорости  $v_{\text{сн}}^{\max}$  – от исходных параметров процесса (вектор  $\mathbf{z} = (p^{\max}, v_{\text{сн}}^{\max})^T$ ), полученных в результате решения системы уравнений (23) для 152 мм ОФ снаряда.

В качестве влияющих параметров рассмотрим вектор  $\mathbf{Y} = (T_p, e_k, u_1, \delta, \chi_0)$  в диапазоне  $[0,95; 1,05]$  от номинальных значений. При случайном распределении параметров  $\mathbf{Y}$  из решения системы уравнений (23) при заданных значениях корректирующих функций  $\Phi$  получено  $N=1000$  точек  $(\mathbf{z}, \mathbf{Y})_j, j = \overline{1, N}$ .

На этих данных проведен сравнительный анализ различных аппроксиматоров: уравнение множественной регрессии; метод опорных векторов; многослойная нейронная сеть; радиальная сеть; метод нечетких деревьев решений.

Выборка из 1000 точек разделена на обучающую выборку (750 точек) и тестовую (250 точек). На тестовой выборке вычислена стандартная ошибка для каждого аппроксиматора. Наилучший результат показала радиальная сеть. Ошибка по максимальному давлению  $p^{\max}$  составляет 2,28 МПа или 0,52%, по дульной скорости  $v_{\text{сн}}^{\max}$  ошибка равна 4,05 м/с или 0,43%. Линейная зависимость показала худшие результаты. Это хорошо иллюстрируют графики сравнения аппроксимированного значения  $p_a^{\max}$  с рассчитанным  $p^{\max}$  по системе уравнений (23). Рисунок 13а соответствует аппроксимации с помощью линейной множественной регрессии, а рисунок 13б – радиальной сети.

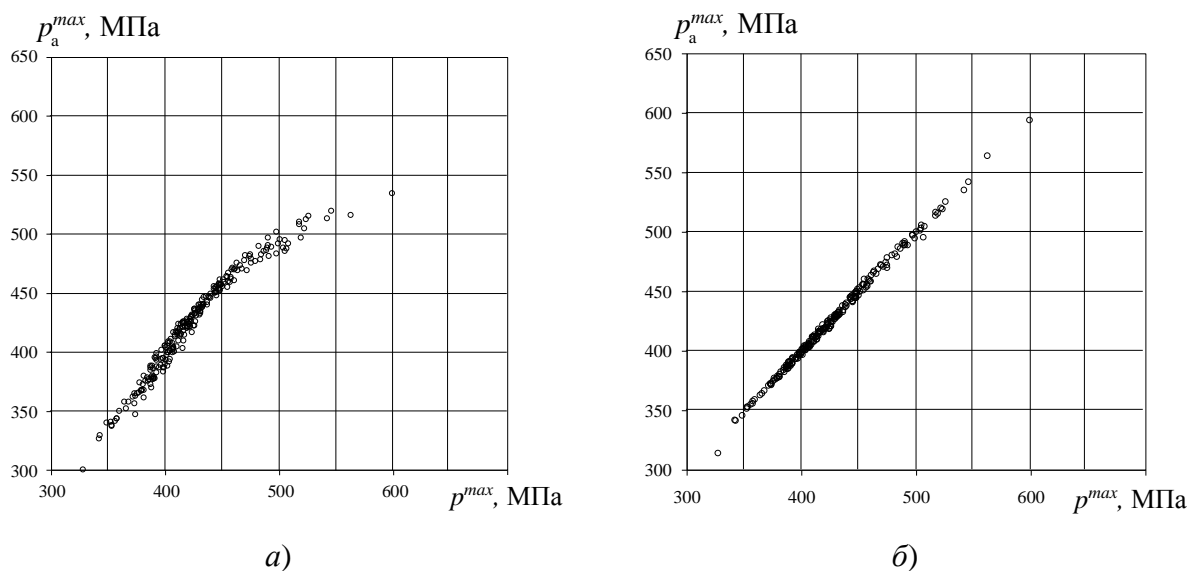


Рисунок 13 – Сравнение аппроксимированных и расчетных давлений:  
а) - линейная множественная регрессия; б) - радиальная нейронная сеть

### ***Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния ствола артиллерийского орудия***

Проведено математическое моделирование динамики напряженно-деформированного состояния ствола на основе модели упруго-пластичного деформирования ствола под воздействием пороховых газов. Давление пороховых газов используется в качестве динамических граничных условий. В

качестве материала ствола в работе рассматривается легированная сталь AISI 4340. При решении задачи напряженно-деформированного состояния исследовалось расширение канала ствола в процессе выстрела. Массовые силы не учитывались. Предполагается, что ствол является однородным, а материал ствола обладает упруго-пластичными свойствами.

В результате решения газодинамической задачи было получено распределение давления внутри ствола  $p = p(x, t)$ . Динамические данные по давлению внутри ствола были выгружены в текстовый файл.

Задача напряженно-деформированного состояния ствола рассчитывалась в программе ANSYS Autodyn. Для задания граничных условий был разработан специальный модуль на языке программирования Фортран. В модуле реализована процедура загрузки исходных данных, расчета давления на границе внутри ствола с помощью линейной интерполяции табличных данных в зависимости от времени и пространственной переменной и выгрузки результатов расчета.

В результате моделирования были получены характеристики напряженно-деформированного состояния ствола. Предел прочности на растяжение для стали AISI 4340 составляет 1 100 МПа. Как видно из рисунка 14, максимальные напряжения не достигают предела прочности во всей области.

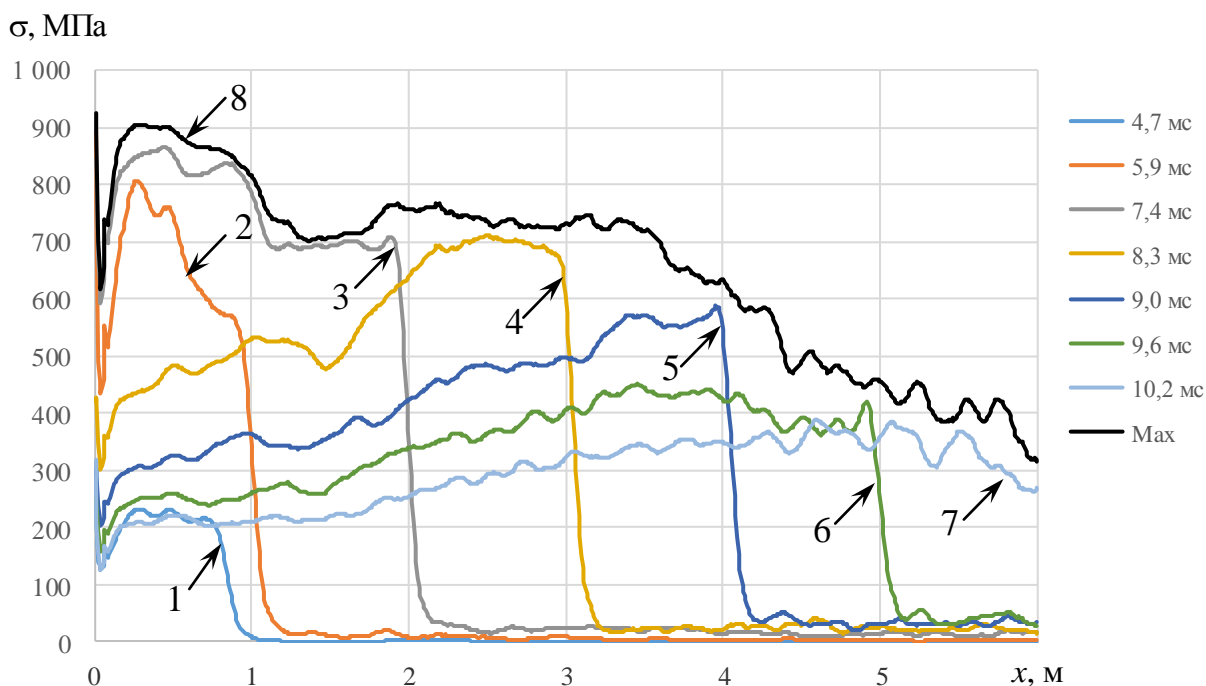


Рисунок 14 – Распределение напряжений в стволе в различные моменты времени:  
 0 – момент начала движения снаряда ( $t=4,7$  мс); 1 – положение снаряда 1 м ( $t=5,9$  мс);  
 2 – положение снаряда 2 м ( $t=7,4$  мс); 3 – положение снаряда 3 м ( $t=8,3$  мс);  
 4 – положение снаряда 4 м ( $t=9,0$  мс); 5 – положение снаряда 5 м ( $t=9,6$  мс);  
 6 – достижение дульного среза 6 м ( $t=10,2$  мс); 7 – эпюра максимальных напряжений)

В области ствола до 3,50 м в рассматриваемом материале достигается предел текучести, что говорит о возможных проблемах, связанных с остаточными деформациями и, в следствие этого, повышенной изнашиваемостью ствола. Результаты исследований коррелируют с экспериментальными данными, где приводятся сведения о наибольшей изнашиваемости ствола на начальном участке движения снаряда.

### Результаты моделирования внешней баллистики

Расчет траектории снарядов проводился по двум методикам аппроксимации коэффициентов лобового сопротивления, коэффициентов аэродинамических сил и моментов. Первая основана на использовании эталонных зависимостей. Вторая – на аппроксимации коэффициентов, полученных в результате решения задачи обтекания снарядов при различных числах Маха, углах атаки и скоростях вращения в программе ANSYS Fluent.

Сравнение эталонных и расчетных зависимостей на примере 125 мм ОФ снаряда представлено на рисунке 15. Результаты моделирования с учетом климатических условий по рассматриваемым коэффициентам лобового сопротивления в проекции  $Oxz$  и сравнение с 4 экспериментальными точками падения снаряда представлены на рисунке 16.

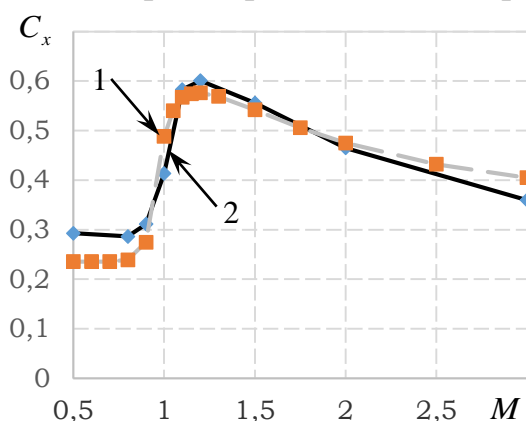


Рисунок 15 – Зависимость коэффициента лобового сопротивления от числа Маха для 125 мм ОФ снаряда:

- 1 – закон сопротивления 1943 г. ( $i_x = 1,5$ );
- 2 – расчетная зависимость

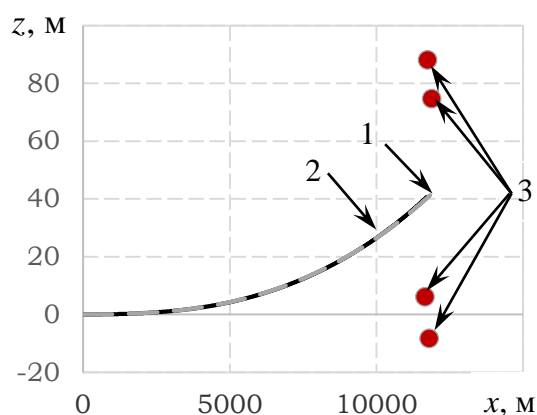


Рисунок 16 – Проекция траектории 125 мм ОФ снаряда на плоскость  $Oxz$  при начальной скорости 835,4 м/с и угле стрельбы 24,2°:

- 1 – закон сопротивления 1943 г. ( $i_x = 1,5$ );
- 2 – расчетные зависимости для коэффициентов сил и моментов;
- 3 – экспериментальные данные

Среднеквадратическое отклонение экспериментальных точек от точки падения, рассчитанной по закону сопротивления 1943 г., составило 123 м, а по расчетной методике – 98 м, что говорит о большей точности разработанной расчетной методики.

### Результаты моделирования бронепробития

В работе представлены результаты комплексного моделирования процесса бронепробития, учитывающего связь между последовательными этапами процесса: внутренняя баллистика, внешняя баллистика и бронепробитие.

Рассматривался артиллерийский выстрел с бронебойно-подкалиберным снарядом. В состав снаряда входят 2 сердечника, бронебойный демпфер, бронебойный наконечник, корпус, оперение и ведущее устройство. Ведущее устройство учитывается в общей массе снаряда только во внутрибаллистическом процессе. На внешней траектории ведущий пояс отстает от активной части снаряда и в дальнейших расчетах не участвует.

Проводилось исследование влияния диаметра сердечника на толщину пробития однородной стальной преграды. Сердечники изготавливаются из вольфрамового сплава, плотность которого более чем в 2 раза превышает

плотность стали, соответственно с увеличением диаметра сердечника общая масса снаряда будет также увеличиваться. Крайними считаются случаи, когда активная часть снаряда полностью состоит из стали или вольфрамового сплава.

На рисунке 17 представлена методика оптимизации.

Внешнебаллистические процессы были рассчитаны с учетом того, что внешняя геометрия снаряда не меняется, соответственно, аэродинамическое сопротивление также не меняется. Дальность стрельбы принималась равной 2000 м.

Зависимости дульной и конечной скорости снаряда от его активной массы представлены на рисунке 18. Как следует из расчетов, несмотря на уменьшение дульной скорости снаряда, конечная скорость на расстоянии 2000 м достигает максимума 1516 м/с.

На рисунке 19 представлена зависимость глубины пробития полубесконечной и конечной преграды в зависимости от активной массы снаряда.

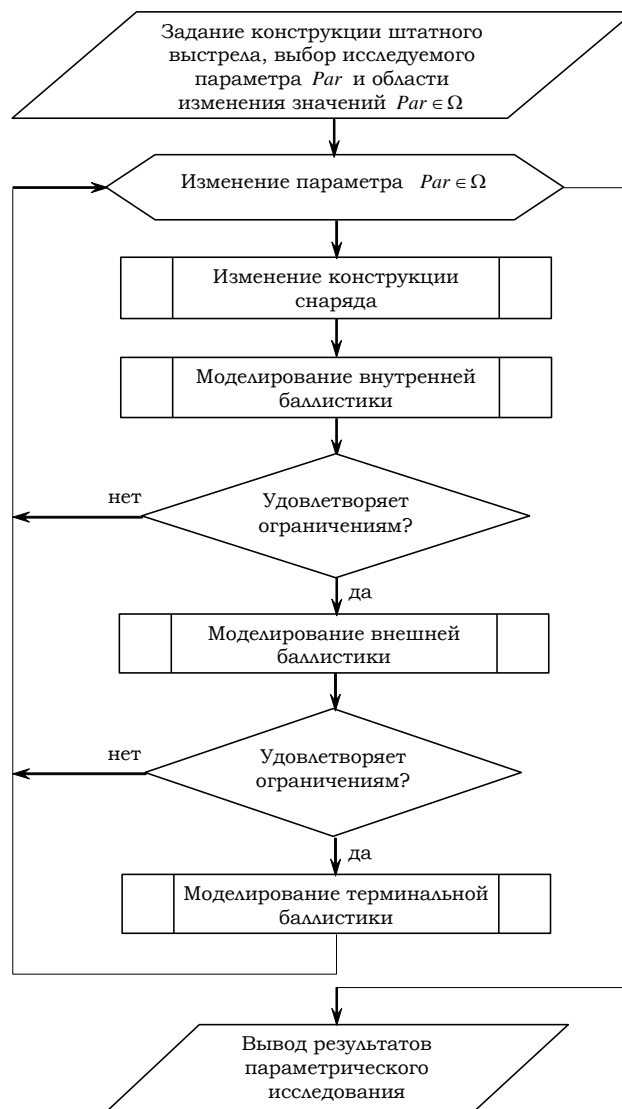


Рисунок 17 – Методика оптимизации параметров бронебойно-подкалиберного снаряда на основе комплексного физико-математического моделирования процесса бронепробития

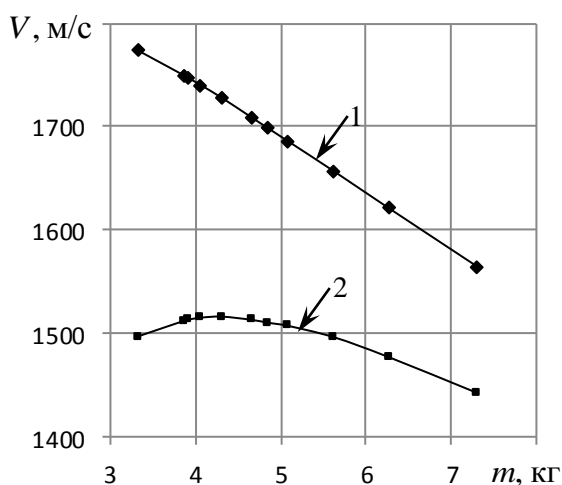


Рисунок 18 – Дульная (1) и конечная (2) скорости снарядов в зависимости от массы активной части снаряда

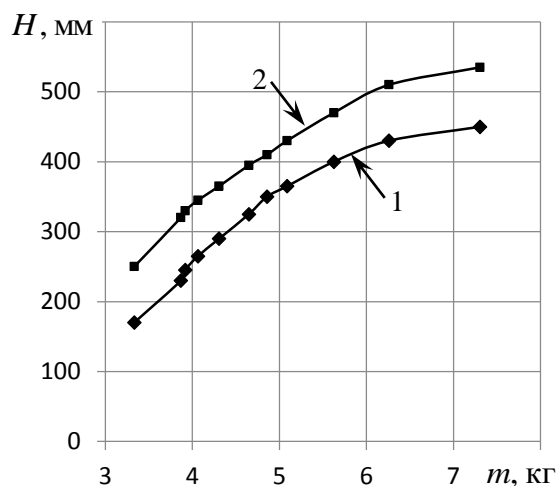


Рисунок 19 – Глубина пробития полубесконечной (1) и конечной (2) преграды в зависимости от массы активной части снаряда



Как следует из рисунка 19 для рассматриваемой конструкции снаряда и заданных параметров расчета существует возможность повышения проникающей способности снаряда по сравнению со штатным за счет изменения диаметра вольфрамового сердечника.

### ***Результаты моделирования осколочного действия***

В работе было проведено исследование по определению вида области осколочного поля при подрыве снаряда на траектории. В результате имитационного моделирования были получены траектории разлета поражающих элементов (рисунок 20).

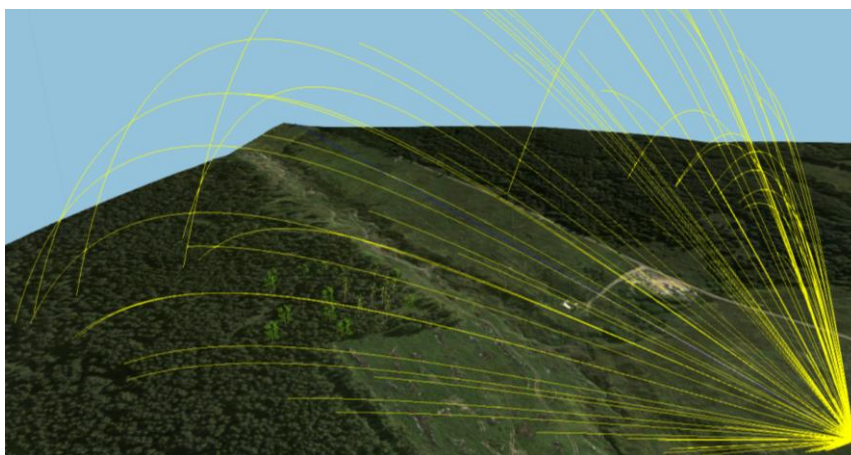


Рисунок 20 – Траектории движения осколков

В результате проведенных расчетов были построены осколочные поля (рисунок 21) в зависимости от высоты подрыва  $h$ . В качестве критического порогового уровня, при котором отображалось осколочное поле, принималось значение  $E_* = 7,4$  кДж/м<sup>2</sup>, обеспечивающее поражение бронированной живой силы.

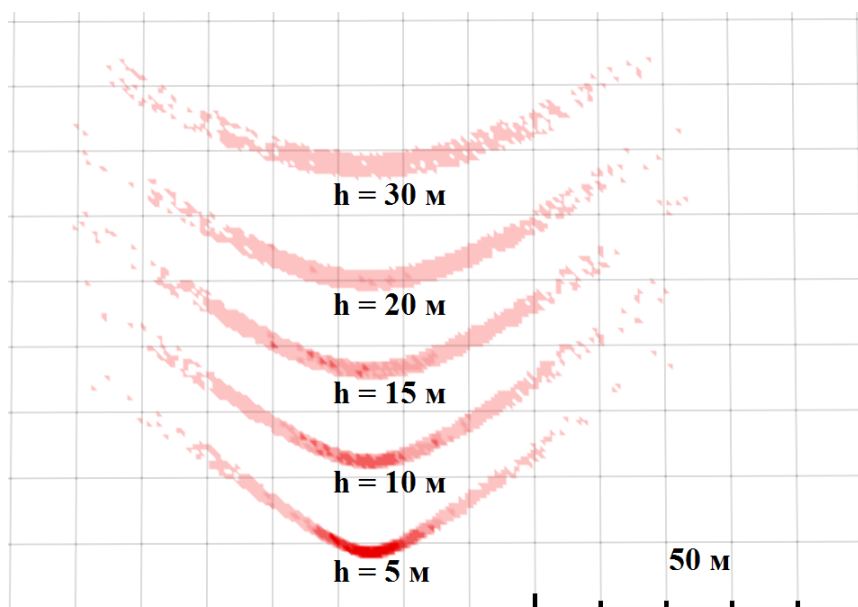


Рисунок 21 – Форма осколочного поля при срабатывании снаряда на траектории на различных высотах  $h$  относительно уровня земли

Результаты моделирования при подрыве на высотах от 1 до 30 метров представлены на рисунке 22.

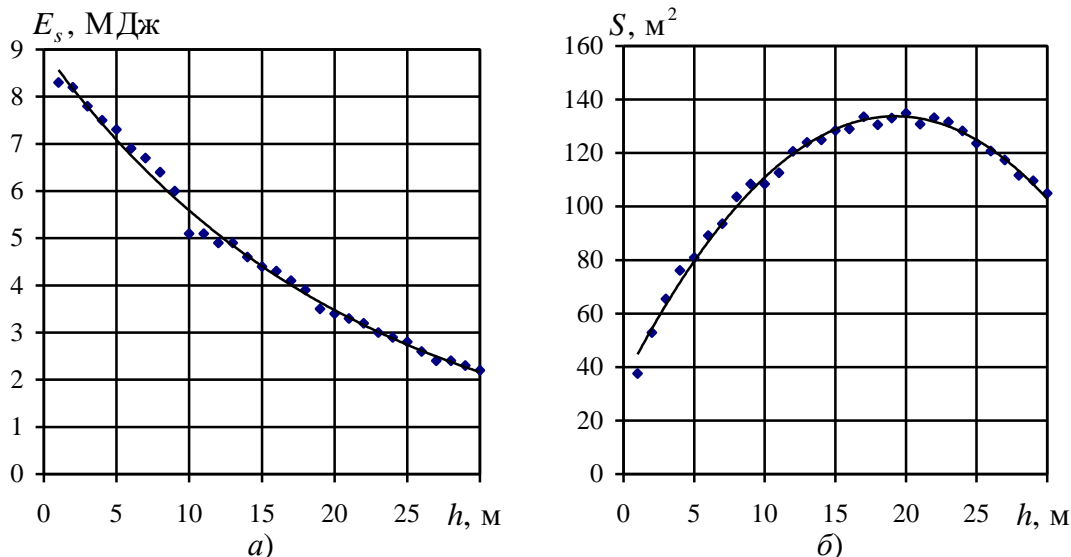


Рисунок 22 – Зависимость энергии осколков (а) и площади области поражения (б) от высоты подрыва снаряда на траектории

Из рисунка 22а видно, что общая энергия осколков на поверхности земли монотонно убывает. Зависимость площади области поражения от высоты подрыва (см. рисунок 22б) была аппроксимирована полиномом второй степени, и определена оптимальная высота подрыва, которая достигает своего максимума в точке  $h^* = 19,0$  м.

### ***Результаты моделирования функционирования измерительно-регистрирующей аппаратуры***

В работе представлены результаты моделирования параметров функционирования измерительно-регистрирующих устройств на полигоне при выстреле из артиллерийского орудия.

Слежение за снарядом осуществляется с помощью опорно-поворотного механизма измерительно-регистрирующего устройства. Расчет вращения опорно-поворотного механизма осуществлялся по данным траектории движения снаряда и координатам положения измерительно-регистрирующего устройства. На основе этих данных рассчитывались параметры измерительно-регистрирующего устройства: азимут поворота  $\varphi_y(t)$ , угол места  $\theta_y(t)$ , угловые скорости  $\dot{\varphi}_y(t)$ ,  $\dot{\theta}_y(t)$  и ускорения  $\ddot{\varphi}_y(t)$ ,  $\ddot{\theta}_y(t)$ , дальность до снаряда  $D_y(t)$ .

Траектория движения гаубичного снаряда была определена на основе решения системы дифференциальных уравнений. Выстрел осуществлялся под углом  $18^\circ$ . Рассматривались три измерительно-регистрирующие устройства МОЭС “Вереск-М”, расположенные в начале, середине и конце траектории движения снаряда.

В результате проведенных расчетов были получены зависимости параметров функционирования от времени для рассматриваемых устройств. Определено время функционирования каждого из МОЭС “Вереск-М” по минимальному расстоянию до снаряда. Показано, что функционирование некоторых измерительно-регистрирующих устройств может не удовлетворять техническим ограничениям по угловой скорости и ускорению. В связи с этим

необходимо изменить расположение устройства для обеспечения возможности фиксации снаряда на начальном участке внешнебаллистической траектории.

### ***Расчет зоны безопасности на полигоне***

Расчет зоны безопасности при стрельбе на полигоне осуществляется в соответствии с методикой, изложенной в приказе Министра обороны РФ от 2 марта 2010 г. № 150. Методика предназначена для расчета величин излетного пространства и боковых защитных зон, обеспечивающих безопасность ведения стрельбы нормально функционирующими боеприпасами на полигоне из артиллерийских систем, минометов, гранатометов и стрелкового оружия на максимальные дальности.

В работе представлена методика расчета излетного пространства и боковых защитных зон с учетом рельефа местности. На рисунке 23 представлены результаты расчета зоны безопасности в программно-вычислительном комплексе конфигурации и визуализации полигонных испытаний.



Рисунок 23 – Зоны безопасности в программном комплексе конфигурации и визуализации полигонных испытаний

**В заключении** сформулированы основные результаты применения визуальных технологий при проектировании и отработке артиллерийских систем в условиях полигонных испытаний и математического моделирования процессов различных стадий артиллерийского выстрела.

**В Приложении А** представлены алгоритмы преобразования геодезических координат.

**В Приложении Б** представлены листинги программ задания граничных условий в ANSYS Autodyn для решения задачи динамического нагружения ствола.

**В Приложении В** представлен акт внедрения в ФКП «НИИ «Геодезия».

**В Приложении Г** представлен акт внедрения в ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова».

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертации решена актуальная научно-техническая задача комплексного моделирования системы полигонных испытаний. Разработанная система позволяет повысить информативность и производительность научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ на стадии проектирования и отработки 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.

Основные результаты работы и выводы:

1. Проведен структурно-функциональный анализ и разработана иерархическая структура системы полигонных испытаний, включающая артиллерийские комплексы, инфраструктуру полигона и измерительно-регистрирующие

устройства. Предложена функциональная модель взаимодействия элементов системы полигонных испытаний и функциональная структура программно-вычислительного комплекса для моделирования и визуализации процесса артиллерийского выстрела.

2. Создана виртуальная система полигонных испытаний, включающая цифровую модель карты полигона с элементами инфраструктуры, объекты испытаний и измерительно-регистрирующего комплекса. Созданы трехмерные геометрические модели элементов системы полигонных испытаний и определены основные характеристики, необходимые для имитационного моделирования процесса артиллерийского выстрела.
3. Разработана комплексная физико-математическая модель процесса артиллерийского выстрела, включающая процессы воспламенения, нестационарного эрозионного горения порохового заряда, движения пороховых элементов и смеси пороховых газов в стволе артиллерийского орудия, напряженно-деформированного состояния ствола артиллерийского орудия под динамическим воздействием давления пороховых газов, движение снаряда по внешнебаллистической траектории с учетом аэродинамической стабилизации, пробития преград артиллерийскими бронебойно-подкалиберными снарядами или с учетом разлета осколков при подрыве осколочно-фугасного снаряда на траектории.
4. Представлено обоснование, реализован и протестирован численный метод решения сопряженной задачи внутренней баллистики в газодинамической постановке и нестационарного эрозионного горения на неравномерной адаптивной сетке.
5. Разработаны генетические алгоритмы многопараметрической оптимизации параметров термодинамических моделей внутренней баллистики и метод построения аппроксимирующих моделей зависимостей между внутрибаллистическими параметрами по результатам численных экспериментов, предназначенные в качестве интеллектуальной поддержки и при принятии управленческих решений для проектирования артиллерийских систем.
6. Разработана методика совместного математического моделирования напряженно-деформированного состояния ствола артиллерийского орудия и основной задачи внутренней баллистики. На основе разработанной методики решена задача динамического нагружения ствола давлением пороховых газов, получены зависимости, отражающие напряжение и деформацию ствола во времени, определены наиболее опасные участки ствола в условиях выстрела.
7. Созданы технология и методика решения комплексной задачи бронепробития гомогенных преград на основе системы взаимосвязанных объектов: «орудие» - «заряд» - «снаряд» - «мишень». Решена задача параметрического исследования влияния конструкции артиллерийского снаряда на глубину пробиваемости преграды с учетом процессов внутренней, внешней и терминальной баллистики.
8. Впервые разработана система статистического имитационного моделирования процесса разлета осколков при подрыве осколочно-

фугасного снаряда на траектории и построения зон поражения с учетом рельефа местности.

9. Разработана система имитационного моделирования измерительно-регистрирующих устройств для определения координат позиционирования и параметров функционирования измерительно-регистрирующей аппаратуры при фиксации траекторий артиллерийских снарядов.
10. Разработан программно-вычислительный комплекс конфигурации и визуализации полигонных испытаний, позволяющий создавать новые элементы моделирования трехмерных объектов, конфигурировать карты местности, размещать элементы инфраструктуры, предназначенный для анализа, оптимизации, принятия управленческих решений на основе обработки информации по результатам моделирования процесса артиллерийского выстрела.
11. Результаты диссертационного исследования внедрены в составе программно-аппаратного комплекса автоматизированной системы полигонных испытаний в ФКП «НИИ «Геодезия» и используются в учебном процессе в ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т.Калашникова». Разработанные технологии позволяют автоматизировать процессы проектирования и отработки артиллерийских систем с использованием комплексной физико-математической модели артиллерийского выстрела, повысить информативность и производительность работ на полигоне за счет применения программно-вычислительного комплекса моделирования и конфигурации полигонных испытаний.

Таким образом, в результате выполнения диссертационной работы внесен существенный вклад в решение народнохозяйственной задачи - повышение информативности и производительности научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ при проведении полигонных испытаний артиллерийского вооружения.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### *Статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК*

1. Русяк И.Г., Ищенко А.Н., Касимов В.З., Суфиянов В.Г., Ермолаев М.А. Программный комплекс моделирования артиллерийского выстрела // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56. № 6-3. С. 51-57. (индексируется в системах MathSciNet, Scopus, WoS, zbMATH)
2. Tenenev V.A., Rusyak I.G., Sufiyanov V.G., Ermolaev M.A., Nefedov D.G. Construction of Approximate Mathematical Models on Results of Numerical Experiments // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2015. Т. 8. № 1. С. 76-87. (индексируется в системе Scopus, WoS(ESCI))
3. Rusyak I., Sufiyanov V., Korolev S., Ermolaev M. Software complex for simulation of internal and external ballistics of artillery shot. – 5th International Conference on Military Technologies, ICMT 2015. V. Krivanek (eds). 19-21 May 2015. Brno. Czech Republic. University of Defense. P. 9-17. (индексируется в системе Scopus)

4. Русяк И.Г., Суфиянов В.Г., Ермолаев М.А. Информационные технологии визуального моделирования внутрибаллистических процессов // Научно-технический журнал Вопросы оборонной техники. Серия 14. 2012. С. 77-82.
5. Королев Д.А., Суфиянов В.Г. Нейроэволюционный подход к оптимизации внутренней структуры нейронных сетей // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2007. № 4. С. 107-122.
6. Липанов А.М., Вагин А.В., Русяк И.Г., Суфиянов В.Г. К вопросу о моделировании полигонных испытаний артиллерийских систем // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2014. № 4. С. 46-52.
7. Вагин А.В., Липанов А.М., Русяк И.Г., Суфиянов В.Г. Имитационное моделирование осколочного поля при срабатывании снаряда на траектории // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2015. № 4. С. 15-20.
8. Липанов А.М., Русяк И.Г., Тененев В.А., Суфиянов В.Г. Математическое моделирование разлета осколков при срабатывании снаряда на траектории // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2015. № 3. С. 79-84.
9. Суфиянов В.Г., Дюпин Д.С., Ермолаев М.А., Сайранов А.С. Использование визуальных технологий при проектировании мишенной обстановки на полигоне // Вопросы оборонной техники. Серия 14. Вып. 2. – М.: НТЦ «Информтехника», 2015. С. 159-163.
10. Суфиянов В.Г., Русяк И.Г., Королев С.А., Белобородов М.Н., Фурсов Ю.С. Моделирование разлета осколков и определение зон поражения при подрыве осколочно-фугасного снаряда // Вопросы оборонной техники. Серия 14. Вып. 2. – М.: НТЦ «Информтехника», 2015. – С. 175-181.
11. Суфиянов В.Г. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния ствола при выстреле // Интеллектуальные системы в производстве. № 3. 2016. С. 13-17.
12. Суфиянов В.Г., Королев С.А. Комплексная физико-математическая модель процесса артиллерийского выстрела // Интеллектуальные системы в производстве. № 3. 2016. С. 18-21.
13. Липанов А.М., Вагин А.В., Русяк И.Г., Суфиянов В.Г. Разработка программного комплекса визуализации результатов моделирования полигонных испытаний артиллерийских систем // Вопросы оборонной техники. Серия 14. Вып. 2. – М.: НТЦ «Информтехника», 2015. – С. 16-24.
14. Суфиянов В.Г., Королев С.А. Моделирование угловых характеристик опорно-поворотного механизма измерительно-регистрирующей аппаратуры при слежении за движением снаряда по внешнебаллистической траектории // Интеллектуальные системы в производстве. № 4(31). 2016. С. 116-119.
15. Королев С.А., Суфиянов В.Г., Русяк И.Г. Методика расчета траектории движения снарядов и ракет при стрельбе с подвижного носителя // Интеллектуальные системы в производстве. № 4(31). 2016. С. 13-18.
16. Суфиянов В.Г. Исследование влияния конструкции снаряда на бронепробитие однородной стальной преграды // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. № 4. 2016. С. 82-85.

17. Суфиянов В.Г., Королев С.А., Липанов А.М., Русяк И.Г. Влияние высоты подрыва снаряда на формирование осколочного поля // Химическая физика и мезоскопия. Т. 18. № 4. 2016. С. 524-533.

**Статьи в других изданиях**

1. Русяк И.Г., Ищенко А.Н., Суфиянов В.Г., Касимов В.З., Ермолаев М.А., Широков В.М. Анализ динамики внутрибаллистических характеристик с использованием программного комплекса моделирования артиллерийского выстрела // Фундаментальные и прикладные проблемы науки. – Т.2. – Материалы VII международного симпозиума (11-13 сентября 2012 года). – М.: РАН, 2012. – С. 245-252.
2. Русяк И.Г., Суфиянов В.Г., Ермолаев М.А. Математическая модель внутрикамерных гетерогенных процессов в артиллерийских системах // Фундаментальные и прикладные проблемы науки. Т.2. Материалы VII международного симпозиума (11-13 сентября 2012 года). – М.: РАН, 2012. – С. 253-264.
3. Русяк И.Г., Суфиянов В.Г., Ермолаев М.А. Постановка сопряженных задач газовой динамики, воспламенения и горения порохов в артиллерийских системах // Фундаментальные и прикладные проблемы науки. Т.2. Материалы VII международного симпозиума (11-13 сентября 2012 года). – М.: РАН, 2012. – С. 265-276.
4. Русяк И.Г., Ищенко А.Н., Касимов В.З., Суфиянов В.Г., Ермолаев М.А., Широков В.М. Математическая модель газовой динамики, постепенного воспламенения, нестационарного и эрозионного горения порохов в артиллерийских системах // Материалы XXIII Всероссийского семинара по струйным, отрывным и нестационарным течениям с международным участием. – Томск: НИУТПУ, 2012. – С. 265-276.
5. Русяк И.Г., Ищенко А.Н., Касимов В.З., Суфиянов В.Г., Саморокова Н.М., Ермолаев М.А. Программный комплекс визуализации результатов моделирования артиллерийского выстрела // Материалы XXIII Всероссийского семинара по струйным, отрывным и нестационарным течениям с международным участием. – Томск: НИУТПУ, 2012. – С. 245-252.
6. Rusyak I., Sufiyanov V., Ermolaev M. Software Modeling of Artillery Shot // 4th International Conference on Military Technologies, ICMT-2013, May 22-23. 2013. Brno. Czech Republic. P. 91-100.
7. Липанов А.М., Вагин А.В., Русяк И.Г., Суфиянов В.Г. Моделирование различных стадий процесса выстрела и полигонных испытаний артиллерийских систем // VIII Всероссийская конференция «Внутрикамерные процессы и горение в установках на твердом топливе и ствольных системах» (ICOC'2014). – Ижевск, 2014. – С. 194-212.
8. Суфиянов В.Г. Разработка визуальных технологий для проектирования и отработки артиллерийских систем на основе комплексной физико-математической модели выстрела // Сборник материалов докладов V Всероссийской научно-технической конференции “Фундаментальные основы баллистического проектирования – 2016”. – СПб.: Изд-во БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, 2016. – С. 242-243.

9. Русяк И.Г., Суфиянов В.Г., Ермолаев М.А. Численный метод решения сопряженной задачи горения и движения комбинированного заряда с последовательно-параллельным расположением пороховых элементов // EUROPEAN SCIENTIFIC CONFERENCE: сборник статей Международной научно-практической конференции / Под общ. ред. Г.Ю. Гуляева – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2017. – С. 28-35.

***Свидетельства о государственной регистрации программ***

1. Русяк И.Г., Суфиянов В.Г., Ермолаев М.А. Программа расчета внутренней баллистики выстрела для зерненного заряда в газодинамической постановке. – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014661855. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 18.11.2014 года.
2. Русяк И.Г., Суфиянов В.Г., Ермолаев М.А. Программа для расчета внутренней баллистики выстрела для трубчатого заряда в газодинамической постановке. – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015661546. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 29.10.2015 года.
3. Русяк И.Г., Суфиянов В.Г., Ермолаев М.А. Программа для расчета внутренней баллистики выстрела для комбинированного заряда в газодинамической постановке. – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016619601. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 24.08.2016 года.
4. Русяк И.Г., Королев С.А., Суфиянов В.Г., Нефедов Д.Г. Программа для расчета параметров рассеивания снарядов и определения зоны безопасности при стрельбе. – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016619602. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 24.08.2016 года.
5. Русяк И.Г., Суфиянов В.Г. Визуализация зон поражения и разлета осколков при срабатывании снаряда на траектории. – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016619603. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 24.08.2016 года.