

народная конференция «Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах»: сб. докл. Пермь: ПНИПУ, 2014. С. 49 – 53.

8. Monaghan J. J. Smoothed particle hydrodynamics // Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Clayton, 1992. – P. 543 – 574.

9. Дерюгин Ю. Н., Полищук С. Н., Тихомиров Б. П. Расчет лучистой теплопроводности в методике МРС с использованием неточных методов Ньютона // XV Международная конференция «Супервычисления и математическое моделирование»: сб. науч. тр. / под ред. Р. М. Шагалиева. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2014. – С. 58 – 59.

10. Zoltan Toolkit [Electronic resource]. Mode of access: <http://www.cs.sandia.gov/zoltan>.

11. Тихомиров Б. П. Автомодельные тепловые волны от сосредоточенного или объемного источника в среде с неоднородными теплофизическими параметрами // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Математическое моделирование физических процессов. – 2010. – Вып. 2. – С. 40-50.

PARALLELIZATION OF COMPUTATIONS TO SOLVE THE RADIATIVE HEAT TRANSFER EQUATION WITH THE SPH METHOD

A. A. Lazarev, S. N. Polishchuk

Russian Federal Nuclear Center –
All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov

The present paper is devoted to the software implementation and parallelization of computations for numerically solving the radiative heat transfer equation with the smoothed particle hydrodynamics (SPH) method. A mixed model is used for parallelization: at the upper level the parallelization in MPI-processes is performed on the distributed memory using the MPI-interface and at the lower level the parallelization in OMP-flows inside an MPI-process is performed on the shared memory using the OpenMP standard. The efficiency of parallelizing using various preconditioners (the block-Jacobi method (JB) and the selective type algebraic multigrid method (AMG)) for solving SLAEs has been estimated on the test problem of radiation propagating from a continuous source.

Key words: the smoothed particle hydrodynamics (SPH) method, radiative heat transfer, implicit scheme, mixed model of parallelizing (MPI+OpenMP), parallelizing efficiency.

УДК: 519.876.5, 623.5

РАЗРАБОТКА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ КОМПЛЕКСА ЗАДАЧ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ОТРАБОТКИ СТРЕЛКОВО-ПУШЕЧНОГО ВООРУЖЕНИЯ

А. М. Липанов¹, И. Г. Русяк², В. Г. Суфиянов², С. А. Королев²

¹Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва

²Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова, Ижевск

Проектирование, создание и отработка новых артиллерийских систем и средств высокоскоростного метания требует проведения значительного объема дорогостоящих экспериментальных исследований и опытных работ. Разработка нового подхода к проектированию артиллерийских сис-

тем, связанного с детализацией процессов артиллерийского выстрела, и применением эффективных вычислительных алгоритмов в соединении с возможностями современных ЭВМ позволяет ставить методы численного исследования в один ряд с натурными экспериментами. К достоинствам такого подхода следует отнести существенное повышение информативности при моделировании, быструю настройку модели на новый объект изучаемого класса и возможность анализа разнообразных физических эффектов, а также возможность оптимизации параметров выстрела и повышение тактико-технических характеристик артиллерийских систем на основе имитационных экспериментов.

Статья посвящена разработке программно-вычислительного комплекса компьютерного моделирования и визуального отображения различных стадий процесса артиллерийского выстрела. Комплексная математическая модель процесса артиллерийского выстрела включает процессы внутренней, внешней и конечной баллистики.

Внутрибаллистические процессы описываются на основе газодинамической модели движения гетерогенных сред. Основная задача внутренней баллистики рассматривается для зарядов, состоящих из зерненных и трубчатых пороховых элементов, с учетом их постепенного воспламенения, нестационарного эрозионного горения и напряженно-деформированного состояния.

Внешнебаллистические процессы описываются системой дифференциальных уравнений движения твердого тела с учетом аэродинамической и гироскопической устойчивости. Создана методика определения полного набора коэффициентов аэродинамических сил и моментов на основе решения задачи гидродинамического обтекания снаряда.

Представлены математические модели процессов конечной баллистики – бронепробития и осколочного действия. Задача бронепробития рассматривается на основе соотношений, описывающих движение сжимаемой упругопластической среды. Задача разлета осколков решается на основе имитационного моделирования движения частиц с начальными условиями, определяемыми из физических характеристик взрывчатых веществ и материала оболочки снаряда. Движение осколков описывается системой дифференциальных уравнений.

Комплексная физико-математическая модель артиллерийского выстрела реализована в виде программно-вычислительного комплекса в состав которого входит модуль конфигурации и визуализации полигонных испытаний, предназначенный для отображения цифровой модели полигона, результатов моделирования процесса артиллерийского выстрела и функционирования измерительно-регистрирующих устройств.

Разработанные компьютерные технологии комплексного математического моделирования процесса артиллерийского выстрела позволяют решать задачи автоматизации процессов проектирования артиллерийских установок и боеприпасов, повышают информативность и производительность работ на полигоне при отработке артиллерийских систем.

Ключевые слова: артиллерийский выстрел, внутренняя баллистика, внешняя баллистика, конечная баллистика, математическое моделирование, проектирование, программно-вычислительный комплекс, вычислительный эксперимент, полигонные испытания, визуализация.

Введение

В ИжГТУ имени М. Т. Калашникова под руководством академика РАН А. М. Липанова разрабатывается программно-вычислительный комплекс, предназначенный для математического моделирования процесса артиллерийского выстрела. Физико-математическая модель артиллерийского выстрела включает процессы внутренней, внешней и конечной баллистики. В состав программно-вычислительного комплекса входит модуль конфигурации и визуализации, используемый для отображения цифровой модели полигона, результатов моделирования процесса артиллерийского выстрела и функционирования измерительно-регистрирующих устройств при проведении полигонных испытаний.

Целью проекта является повышение информативности и производительности научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ на стадии проектирования и отработки боеприпаса и артиллерийских установок, за счет применения объектно-ориентированных стандартизи-

рованных вычислительных методик инженерного моделирования процессов, протекающих при срабатывании артиллерийского выстрела.

1. Комплексный подход к решению проблемы проектирования

Процесс проектирования образцов стрелково-пушечного вооружения в интерактивном режиме проходит ряд последовательно-параллельных стадий (рис. 1), которые, в свою очередь, содержат определенный набор задач (рис. 2). Более подробно состав задач различных стадий проектирования представлен на рис. 3 – 5.

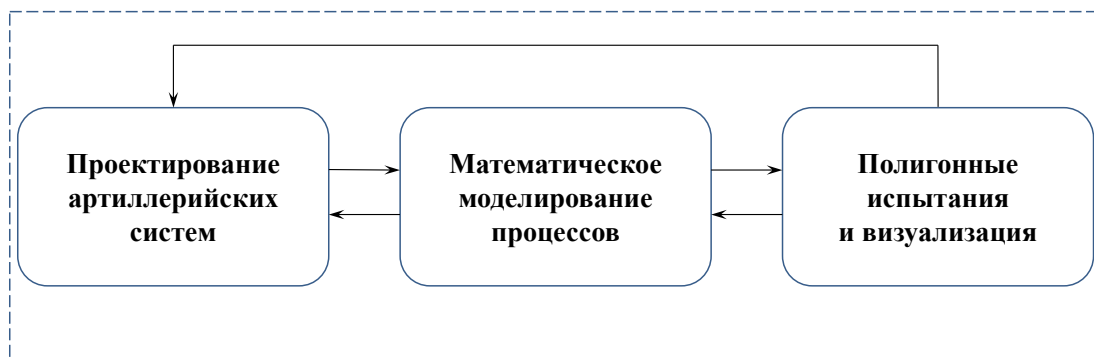


Рис. 1. Взаимосвязь стадий проектирования, моделирования и проведения полигонных испытаний артиллерийских систем

Проектирование артиллерийских систем	Математическое моделирование процессов	Полигонные испытания и визуализация
1. Базы данных: - материалы; - снаряды; - заряды; - стволы и др. 2. Программные комплексы: - АРМ конструктора заряда; - АРМ конструктора снаряда; - АРМ конструктора ствола и др. 3. Цифровое предприятие (полигон): - хранение данных; - унификация обмена информацией.	1. Внутренняя баллистика: - термодинамика; - газодинамика; - гетерогенные среды; - горение и химические процессы; - тепломассообмен. 2. Внешняя баллистика: - аэродинамика; - устойчивость; - обтекание снаряда; 3. Конечная баллистика: - пластичность; - разрушение; - гидродинамика.	1. Прогнозирование результатов полигонных испытаний артиллерийских систем. 2. Моделирование параметров функционирования измерительно-регистрающей аппаратуры. 3. Автоматизация обработки и визуализация результатов моделирования процессов полигонных испытаний.

Рис. 2. Основные задачи при проектировании и обработке артиллерийских систем

Базы данных элементов артиллерийских установок	Автоматизированные рабочие места конструкторов	Цифровое предприятие (полигон)
1. Материалы: - взрывчатые вещества; - пороха; - воспламенители; - капсули; - металлы и др. 2. Снаряды: - бронебойные; - осколочно-фугасные; - кумулятивные и др. 3. Заряды: - зеренные; - трубчатые; - комбинированные; - сгораемые гильзы и др. 4. Стволы: - эжекторы; - дульные тормоза; - газоотводные трубки и др. 5. Прочие элементы.	1. АРМ конструктора снаряда: - конструкция снаряда; - прочность снаряда; - кинетическое действие; - осколочное действие; - фугасное действие; - кумулятивное действие. 2. АРМ конструктора заряда: - конструкция заряда; - оптимизация компонентов элементов заряда; - баллистика и прочность элементов заряда. 3. АРМ конструктора ствола: - конструкция ствола - прочность, термо- и износостойкость ствола; - колебания ствола и др.	1. Создание единого информационного пространства предприятия. 2. Использование единых форматов представления 3D моделей изделий и документации. 3. Сквозные технологии 3D проектирования, моделирования и визуализации. 4. Взаимодействие с клиентами посредством современных защищенных коммуникационных каналов.

Рис. 3. Состав задач проектирования артиллерийских систем

Повышение информативности, производительности и эффективности научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ при проектировании и отработки боеприпаса и артиллерийских установок невозможно без создания автоматизированных рабочих мест (АРМ) конструкторов, интегрированных по процессам моделирования, стадиям и объектам проектирования.

Для примера рассмотрим АРМ конструктора заряда.

Предназначение АРМ конструктора заряда:

1. Автоматизация подготовки исходных данных.
2. Проведение оценочных и сравнительных расчетов влияния конструкции заряда на баллистику выстрела.
3. Автоматизация обработки результатов вычислений в различных видах и формах, включая визуализацию исследуемого процесса.
4. Оптимизация конструкции заряда по различным баллистическим критериям.

Внутренняя баллистика	Внешняя баллистика	Конечная баллистика
1. Воспламенение и горение пороховых элементов. 2. Движение смеси твердой фазы и пороховых газов в канале ствола при выстреле. 3. Теплообмен газов с пороховыми элементами и со стволом орудия. 4. Прочность и деформации ствола. 5. Прочность, деформации и устойчивость снаряда; 6. Прочность и разрушение пороховых элементов при выстреле. 7. Истечение газов после выстрела. Период последствия. 8. Дульный тормоз. 9. Откат ствола.	1. Аэродинамика обтекания снаряда (ракеты). 2. Аэродинамические силы и моменты сил. 3. Оптимизация аэродинамической формы. 4. Траектория снаряда (ракеты). 5. Аэродинамическая и гироскопическая стабилизация. 6. Асимметрия формы и массы снаряда. 7. Оптимизация баллистических условий. 8. Обратная задача внешней баллистики. 9. Характеристики рассеивания. 10. Зоны безопасности. 11. Стрельба с подвижного носителя. 12. Таблицы стрельбы.	1. Кинетическое действие: - ударное динамическое взаимодействие снаряда с преградой; - упругие, вязкие, пластические деформации. 2. Осколочное действие: - разрушение снаряда в результате детонации; - разлет осколков; - форма области поражения. 3. Фугасное действие: - разлет продуктов детонации; - ударная волна. 4. Кумулятивное действие: - ударное динамическое взаимодействие - гидродинамика; - пластические деформации.

Рис. 4. Состав задач математического моделирования при проектировании артиллерийских систем

Прогнозирование результатов полигонных испытаний	Моделирование измерительно-регистрающей аппаратуры	Визуализация результатов полигонных испытаний
1. Прогнозирование внутренней баллистики: <ul style="list-style-type: none"> - вычисление начальной скорости снаряда; - решение прочностных задач для ствола и снаряда. 2. Прогнозирование внешней баллистики: <ul style="list-style-type: none"> - построение траектории движения снаряда; - определение точек падения снарядов - построение зон безопасности 3. Прогнозирование результатов конечной баллистики: <ul style="list-style-type: none"> - бронепробитие; - разлет осколков; - область поражения. 	1. Оптимизация количества приборов, определение координат позиционирования и параметров функционирования измерительно-регистрающей аппаратуры при фиксации внешнебаллистических траектории артиллерийских снарядов. 2. Синхронизация срабатывания измерительно-регистрающей аппаратуры по времени. 3. Сравнительный анализ результатов вычислительных и натуральных экспериментов.	1. Визуализация 3D карты полигона: <ul style="list-style-type: none"> - загрузка больших участков земной поверхности; - высокоточная визуализация рельефа местности, инфраструктуры испытательного полигона, ландшафта и т.п. 2. Визуализация результатов моделирования внутренней, внешней и конечной баллистики, а также результатов натуральных испытаний. 3. Визуализация зоны поражения и зоны безопасности на 3D карте полигона.

Рис. 5. Состав задач моделирования и визуализации полигонных испытаний артиллерийских систем

Структура АРМ конструктора заряда:

1. Базы данных.
2. Программный комплекс геометрического проектирования конструкции заряда.
3. Программный комплекс математического моделирования внутрикамерных процессов.
4. Программный комплекс автоматизации обработки и визуализация результатов моделирования.

Базы данных АРМ конструктора заряда:

1. База данных элементов артиллерийского заряда, включая капсули, воспламенители, пламегасители, размеднители, пороховые элементы, картузы, поддоны, металлические гильзы, сгораемые гильзы и др. (массовые и геометрические характеристики).
2. База данных артиллерийских снарядов (массовые и геометрические характеристики).
3. База данных артиллерийских стволов, включая эжекторы, дульные тормоза, газоотводные трубки (геометрические характеристики).
4. База данных материалов (теплофизические, энергетические, механические и прочностные характеристики).
5. База данных типовых конструкций артиллерийских выстрелов.

Программный комплекс геометрического проектирования конструкции заряда, снаряда и канала ствола разрабатывается на основе САПР Компас 3D [1]. Некоторые геометрические модели, выполненные с использованием данного пакета, приведены на рис. 6.

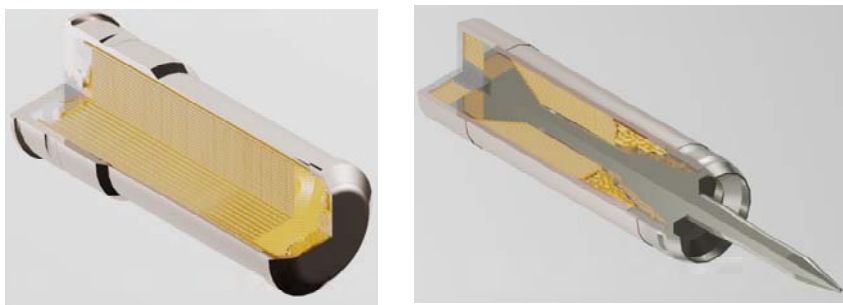


Рис. 6. Конструкция заряда

Программный комплекс математического моделирования внутрикамерных процессов ориентирован на отечественный пакет инженерного моделирования и анализа ЛОГОС [2] и включает следующий набор задач:

1. Моделирование процессов горения порохов.
2. Моделирование тепломассообмена в условиях, приближенных к артиллерийскому выстрелу.
3. Моделирование напряженно-деформированного состояния ствола и снаряда.
4. Решение задачи прочности и разрушения пороховых элементов в процессе выстрела при различных начальных температурах.
5. Учет взаимодействия снаряда с поверхностью канала ствола.
6. Расчет дульного тормоза и отката ствола.
7. Расчет периода последействия (эжектор).
8. Расчет дульного и обратного пламени.
9. Определение разбросов параметров при стрельбе.
10. Расчет таблиц стрельбы.
11. Решение задачи стрельбы очередью.
12. Расчет баллистики при различных температурах заряда, снаряда, ствола.
13. Расчет эпюры максимальных давлений.

Программный комплекс автоматизации обработки и визуализации результатов моделирования разрабатывается на основе свободно распространяемого программного обеспечения [3]. Элементы программного комплекса представлены на рис. 7.

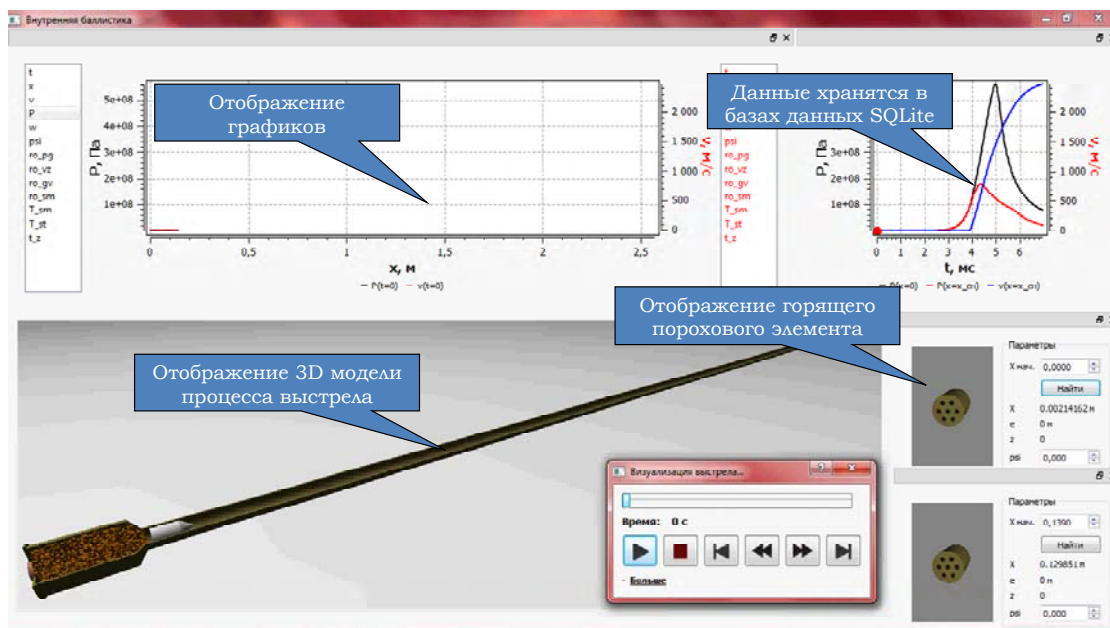


Рис. 7. Главное окно расчетного модуля внутренней баллистики

2. Разработка виртуальных моделей

Концептуальная схема преобразования реальных физических объектов и процессов полигонных испытаний в виртуальные объекты моделирования представлена на рис. 8.

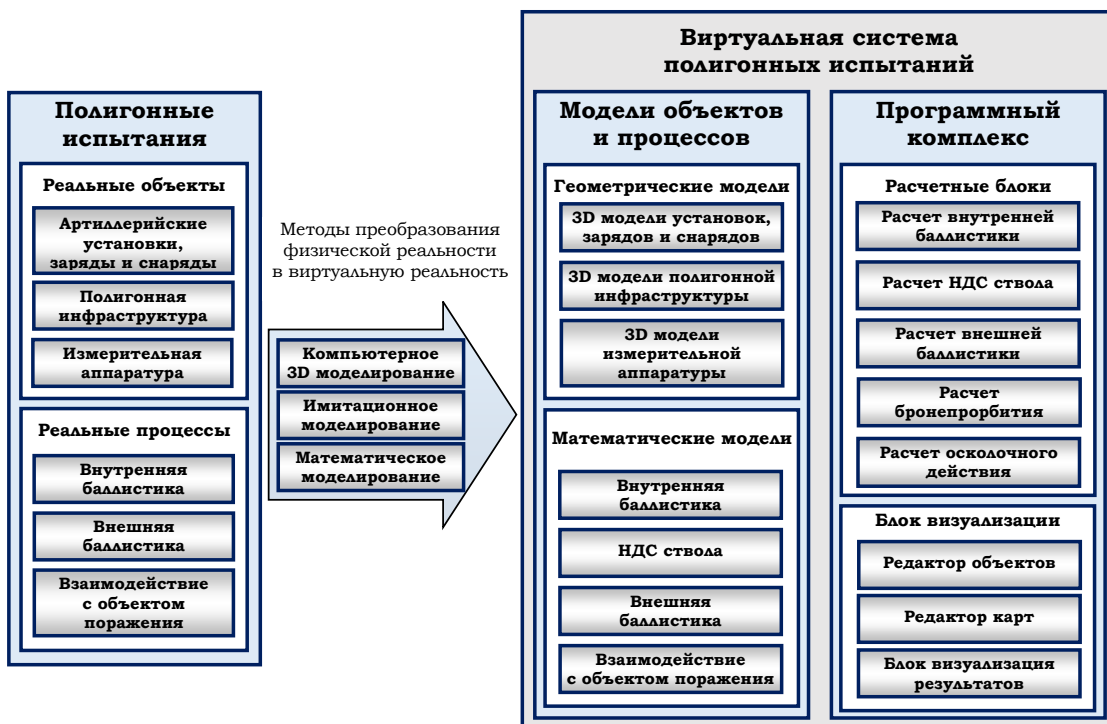


Рис. 8. Концептуальная схема представления виртуальной системы полигональных испытаний

Виртуальная система полигональных испытаний (см. рис. 8) содержит геометрические модели объектов полигональных испытаний и математические модели процессов артиллерийского выстрела, а также расчетные блоки и блок визуализации. Взаимосвязь между процессами проектирования, моделирования и визуализации полигональных испытаний артиллерийских систем представлена на рис. 9.



Рис. 9. Взаимосвязь процессов проектирования, моделирования и полигональных испытаний артиллерийских систем

На первом этапе создаются 3D модели артиллерийских устройств, артиллерийских выстрелов и мишеней. Готовые 3D модели можно импортировать из различных сред 3D моделирования и систем автоматизированного проектирования (САПР). Разработанные 3D модели в дальнейшем ис-

пользуются при математическом моделировании процессов артиллерийского выстрела. Примеры разработанных моделей броневойно-подкалиберных (БП), оперенных и неоперенных (вращающихся) осколочно-фугасных (ОФ) снарядов представлены на рис. 10.

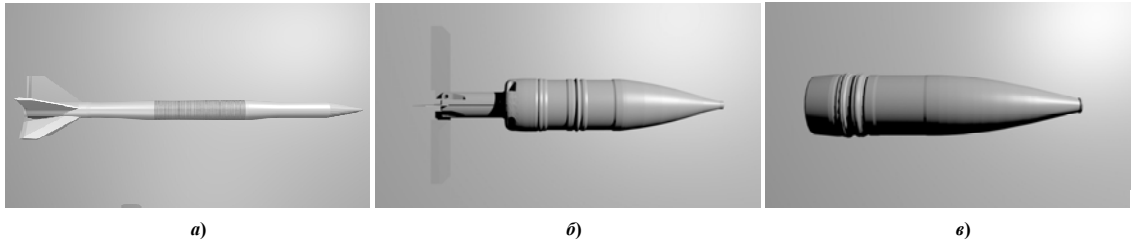


Рис. 10. Примеры виртуальных моделей снарядов: а – БП снаряд калибра 125 мм; б – ОФ оперенный снаряд калибра 125 мм; в – ОФ вращающийся снаряд калибра 152 мм

После создания 3D объектов последовательно проводится моделирование процессов внутренней, внешней и конечной баллистики в программном комплексе [4]. Результаты моделирования отображаются на 3D цифровой карте полигона, на которой содержатся виртуальные модели объектов полигонной инфраструктуры, артиллерийские установки, мишени, измерительно-регистрирующие устройства с учетом их геодезических координат и рельефа местности.

3. Моделирование баллистических процессов выстрела

3.1. Моделирование внутренней баллистики

Основная задача внутренней баллистики решается в одномерной постановке применительно к конструкциям зарядов, приведенным на рис. 11. Газодинамический подход к математическому моделированию внутрикамерных процессов базируется на применении принципов механики многокомпонентных гетерогенных реагирующих сред [5 – 13].

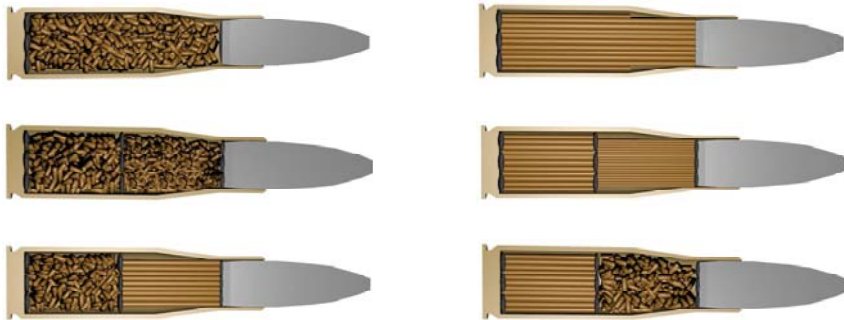


Рис. 11. Схемы артиллерийских боеприпасов

Система уравнений внутренней баллистики для смеси газов и продуктов горения при допущениях и обозначениях, принятых в [5], имеет вид:

$$\frac{\partial \rho_i m S}{\partial t} + \frac{\partial \rho_i m S v}{\partial x} = S A_i, \quad (i=\overline{1,5}), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho m S v}{\partial t} + \frac{\partial \rho m S v^2}{\partial x} = -m S \frac{\partial p}{\partial x} - S(\tau_{w1} + \tau_{w2}) + S \left(G_1 + G_2 + \sum_{j=1}^3 G_{Bj} \right) w - S(G_{51} + G_{52}) v - \Pi_c \tau_c,$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho m S \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho m S \varepsilon v}{\partial x} = -p \frac{\partial [m S v + (1-m) S w]}{\partial x} + S(\tau_{w1} + \tau_{w2})(v-w) + \\ + S G_1 \left[Q_1 + \frac{(v-w)^2}{2} \right] + S G_2 \left[Q_2 + \frac{(v-w)^2}{2} \right] + S \sum_{j=1}^3 G_{Bj} \left[Q_{Bj} + \frac{(v-w)^2}{2} \right] - \\ - S(q_{T1} + q_{T2}) + \Pi_c \tau_c v - \Pi_c q_c, \\ p(1 - \alpha p_r) = \theta p \varepsilon, \end{aligned}$$

где

$$A_i = \left(G_1; G_2; 0; \sum_{j=1}^3 \xi_0 G_{Bj}; \sum_{j=1}^3 (1 - \xi_0) G_{Bj} - G_{51} - G_{52} \right)^T, \\ G_B = \frac{\omega_B}{S \Delta x_B} A_0 f(\Psi_B) p^{v_B}.$$

Начальные условия:

при $t = 0$, $0 \leq x \leq L_{KM}$

$$\begin{aligned} v = 0, \quad p = 98100 \text{ Па}, \quad T = T_H, \quad \Psi_1 = \Psi_2 = 0, \\ \rho_1 = \rho_2 = \rho_4 = \rho_5 = 0, \quad \rho_3 = \frac{p}{R_3 T_H}, \quad \Psi_{Bj} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Для области течения, занятой зерненым порошком, имеем:

$$\begin{aligned} \frac{\partial a_i S}{\partial t} + \frac{\partial a_i S w}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial \delta_i (1-m) S w}{\partial t} + \frac{\partial \delta_i (1-m) S w^2}{\partial x} = -(1-m) S \frac{\partial p}{\partial x} + S \tau_{wi} - S G_i w. \end{aligned} \quad (3)$$

Для области течения, занятой трубчатым порошком, имеем:

$$\begin{aligned} n_i = \text{const}, \\ (1 - \bar{\Psi}_i) \omega_i \frac{dw}{dt} = [(1-m)S]_0 p_0 - p_{L_i} [(1-m)S]_{L_i} p_{L_i} + \int_0^{L_{0i}} \left[p \frac{\partial (1-m)S}{\partial x} + S \tau_{wi} \right] dx. \end{aligned} \quad (4)$$

Уравнение горения пороховых элементов:

$$\frac{\partial \Psi_i}{\partial t} + w \frac{\partial \Psi_i}{\partial x} = \frac{S_{0i}}{\Lambda_{0i}} \sigma_i(\Psi_i) u_{ki} = \frac{\kappa_{pi}}{e_{1i}} \sigma_i(\Psi_i) u_{ki}, \quad i = 1, 2. \quad (5)$$

Уравнение горения воспламенителей:

$$\frac{\partial \Psi_{Bj}}{\partial t} + w \frac{\partial \Psi_{Bj}}{\partial x} = \frac{d\Psi_{Bj}}{dt} = A_{0j} f(\Psi_{Bj}) p^{v_{Bj}}, \quad j = \overline{1, 3}. \quad (6)$$

Граничные условия:

при $x = 0$, $t \geq 0$

$$v = 0; \quad (7)$$

в случае, если нижний полузаряд состоит из зерненого пороха, $w = 0$;

при $x = x_{сн}$, $t \geq 0$

$$q \frac{dv_{сн}}{dt} = S_{сн} (p_{сн} - p_{пр}) - F. \quad (8)$$

Система уравнений (1) – (8) описывает лишь газодинамическую часть математической модели внутренней баллистики, которая в расширенном варианте включает в себя математические модели воспламенения и последующего нестационарного и эрозийного горения пороха, а также вопросы деформации и разрушения пороховых элементов в условиях выстрела. Численные методы и алгоритмы решения соответствующих сопряженных задачи приведены в [5].

3.2. Моделирование внешней баллистики

Блок моделирования внешней баллистики включает комплекс задач, представленных на рис. 12.

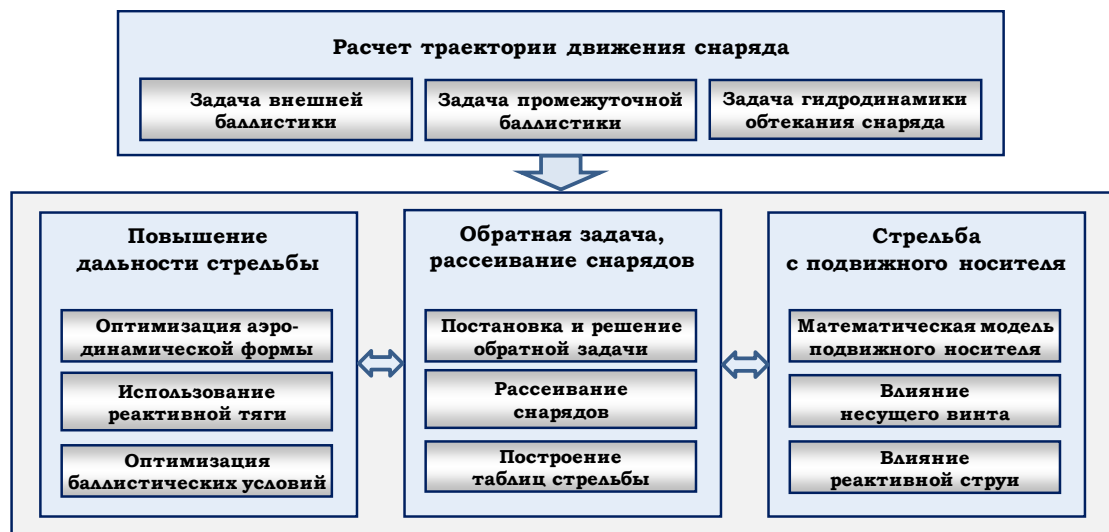


Рис. 12. Комплекс задач внешней баллистики

Математическая модель внешней баллистики и методика расчета траектории движения снаряда основана на решении полной системы уравнений движения, учитывающей вращение и колебания относительно центра масс [14], с использованием коэффициентов аэродинамических сил и моментов, рассчитанных на основе моделирования гидродинамики обтекания снаряда [15].

Траектория движения снаряда строится в стартовой системе координат $Ox_c y_c z_c$, связанной с точкой расположения орудия и ориентированной по направлению стрельбы (рис. 13). Координаты центра масс снаряда определяются уравнениями [14]:

$$\frac{dx_c}{dt} = V_k \cos \theta \cos \psi, \quad \frac{dy_c}{dt} = V_k \sin \theta, \quad \frac{dz_c}{dt} = -V_k \cos \theta \sin \psi, \quad (9)$$

где x_c – дальность; y_c – высота полета; z_c – боковое отклонение; θ – угол наклона траектории; ψ – угол направления стрельбы; V_k – скорость центра масс снаряда.

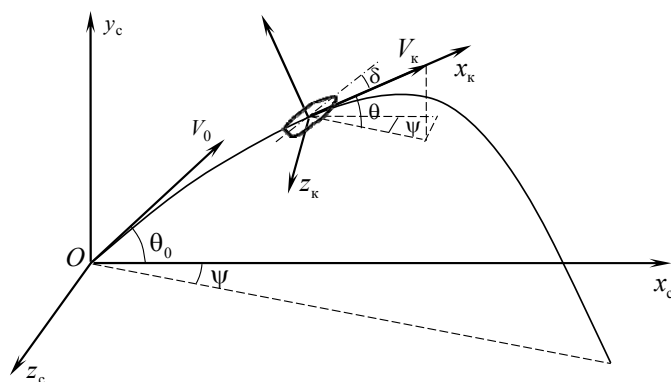


Рис. 13. Ориентация стартовой ($Ox_c y_c z_c$) и траекторной ($O'x_k y_k z_k$) систем координат

Параметры движения снаряда определяются в траекторной системе координат $O'x_k y_k z_k$, связанной с центром масс снаряда и ориентированной по вектору скорости (см. рис. 13). В обозначениях, принятых в работе [15], система уравнений движения центра масс снаряда имеет вид:

$$\begin{aligned}\frac{dV_k}{dt} &= -g \sin \theta - \frac{C_{x_k} q S_M}{m}, \\ \frac{d\theta}{dt} &= -\frac{g \cos \theta}{V_k} - \frac{C_{y_k} q S_M}{m V_k} + \frac{d\theta_g}{dt}, \\ \frac{d\psi}{dt} &= -\frac{C_{z_k} q S_M}{m V_k \cos \theta} + \frac{d\psi_g}{dt}.\end{aligned}\quad (10)$$

Для вращающегося снаряда аксиальная скорость определяется из уравнения:

$$\frac{d\omega_x}{dt} = -\frac{m_x q S_M l}{I_x}.\quad (11)$$

Задача колебаний снаряда относительно центра масс решается на основе уравнений для горизонтальной ω_1 и вертикальной ω_2 составляющих экваториальной угловой скорости снаряда [15]:

$$\begin{aligned}\frac{d\omega_1}{dt} &= \frac{m_1 q S_M l - I_x \omega_x \omega_2}{I_z}, \\ \frac{d\omega_2}{dt} &= \frac{m_2 q S_M l + I_x \omega_x \omega_1}{I_z}.\end{aligned}\quad (12)$$

Горизонтальная δ_1 и вертикальная δ_2 составляющие угла нутации снаряда определяются из уравнений:

$$\begin{aligned}\frac{d\delta_1}{dt} &= \frac{\omega_1 - \dot{\psi} \cos(\theta + \delta_2) - \dot{\theta} \delta_1 \delta_2}{\cos \delta_2}, \\ \frac{d\delta_2}{dt} &= \omega_2 - \dot{\psi} \sin \theta \delta_1 - \dot{\theta} \cos \delta_1.\end{aligned}\quad (13)$$

Система обыкновенных дифференциальных уравнений (9) – (13) решается методом Рунге-Кутты-Вернера 6-го порядка точности с контролем погрешности интегрирования [16].

Для расчета аэродинамических сил и моментов, действующих на снаряд, применен подход, основанный на численном моделировании обтекания снаряда потоком воздуха. При этом решались уравнения Навье-Стокса, осредненные по Фавру (FANS), с использованием полуэмпирической модели турбулентности [17 - 18]. Такой подход не требует значительных вычислительных ресурсов, что позволяет рассчитать аэродинамические характеристики обтекания исследуемых тел в широком диапазоне параметров. Численная методика решения задачи обтекания снаряда реализована с помощью модулей вычислительной гидроаэромеханики ЛОГОС [2] и ANSYS [19].

Исследование аэродинамических характеристик снарядов проводилось в широком диапазоне изменения параметров: числа Маха $M = 0,5 \div 5,0$; углы атаки $\alpha = 0 \div 20^\circ$; скорости вращения снаряда $\omega_x = 500 \div 2000$ рад/с [7]. По результатам численного эксперимента для исследуемых метаемых тел с помощью метода наименьших квадратов строились аппроксимационные зависимости для коэффициентов аэродинамической силы и моментов ($C_{x_k}, C_{y_k}, C_{z_k}, m_x, m_1, m_2$), используемые в уравнениях (10) – (12).

3.3. Моделирование конечной баллистики

3.3.1. Моделирование пробивания преграды

Основной характеристикой эффективности действия бронебойных снарядов является толщина пробития преграды, которая зависит от скорости и угла полета (рис. 14), а также от материалов и конструкции снаряда и преграды.

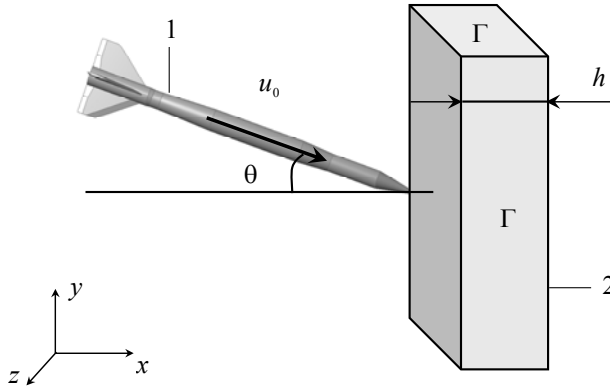


Рис. 14. Схема динамического взаимодействия снаряда с преградой

В задачах моделирования процесса бронепробития снаряд и преграда рассматриваются как сжимаемые упругопластические тела.

Основные соотношения, описывающие движение сжимаемой упругопластической среды, базируются на законах сохранения массы, импульса и энергии, которые в обозначениях работы [20], записываются в виде:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{\partial \dot{i}_\alpha}{\partial x_\alpha} = 0, \quad (14)$$

$$\frac{d\dot{i}_\alpha}{dt} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{\alpha\beta}}{\partial x_\beta} = 0,$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{\rho} \sigma_{\alpha\beta} \dot{\varepsilon}_{\alpha\beta}$$

с начальными условиями:

$$\dot{i}_{1x}(0) = u_0 \cos(\theta), \quad \dot{i}_{1y}(0) = -u_0 \sin(\theta), \quad \dot{i}_{1z}(0) = 0, \quad (15)$$

$$\dot{i}_{2x}(0) = \dot{i}_{2y}(0) = \dot{i}_{2z}(0) = 0$$

и граничными условиями:

$$u_{2x}(t)|_\Gamma = u_{2y}(t)|_\Gamma = u_{2z}(t)|_\Gamma = 0, \quad (16)$$

$$\dot{i}_{2x}(t)|_\Gamma = \dot{i}_{2y}(t)|_\Gamma = \dot{i}_{2z}(t)|_\Gamma = 0.$$

В качестве уравнения состояния моделируемой среды используется уравнение состояния Грюнайзена

$$p = p_n + \Gamma \rho (E - E_n), \quad (17)$$

где

$$p_n = \frac{\rho_0 c_0 \mu (1 + \mu)}{[1 - (\chi - 1)\mu]^2}, \quad E_n = \frac{p_n}{2\rho_0} \left(\frac{\mu}{1 + \mu} \right), \quad \rho \Gamma = \rho_0 \Gamma_0 = \text{const}, \quad \mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1.$$

Для описания пластических течений используется теория Прандтля-Рейсса с условием текучести Мизеса. Для определения начала пластических течений используется модель Джонсона-Кука [21]:

$$\sigma_n = \left(A + B \varepsilon_p^n \right) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right], \quad (18)$$

Для определения условий разрушения материала используют критические значения эквивалентных напряжений.

3.3.2. Моделирование разлета осколков

Исходными данными для моделирования осколочного действия снаряда при подрыве на траектории являются скорость снаряда, угол наклона траектории и скорость вращения снаряда. Начальная скорость и углы разлета осколков, а также распределение их массовых характеристик определяется с учетом рассмотренных выше параметров [22]. Движение осколков моделируется на основе решения системы дифференциальных уравнений, которые представлены в обозначениях работы [23]:

$$\begin{aligned} \frac{du_x}{dt} &= -\frac{\Phi c_d (|\mathbf{u} - \mathbf{v}|)}{2m_s^{1/3} \rho_M^{2/3}} \rho |\mathbf{u} - \mathbf{v}| (u_x - v_x), \\ \frac{du_y}{dt} &= -\frac{\Phi c_d (|\mathbf{u} - \mathbf{v}|)}{2m_s^{1/3} \rho_M^{2/3}} \rho |\mathbf{u} - \mathbf{v}| (u_y - v_y) - g, \\ \frac{du_z}{dt} &= -\frac{\Phi c_d (|\mathbf{u} - \mathbf{v}|)}{2m_s^{1/3} \rho_M^{2/3}} \rho |\mathbf{u} - \mathbf{v}| (u_z - v_z), \\ \frac{dx}{dt} &= u_x, \quad \frac{dy}{dt} = u_y, \quad \frac{dz}{dt} = u_z \end{aligned} \quad (19)$$

с начальными условиями при $t = 0$:

$$\begin{aligned} x(0) &= X_k, \quad y(0) = Y_k, \quad z(0) = Z_k, \\ u_x(0) &= (u_{\max} \sin \phi + \Omega_k R_0 \sin \phi \cos \Theta_k) \cos \vartheta + V_x, \\ u_y(0) &= u_{\max} \cos \phi - \Omega_k R_0 \sin \phi \cos \Theta_k + V_y, \\ u_z(0) &= (u_{\max} \sin \phi + \Omega_k R_0 \cos \phi) \sin \vartheta + V_z. \end{aligned} \quad (20)$$

Коэффициент сопротивления в зависимости от скорости движения осколка определяется соотношением, представленным в работе [23]. Система дифференциальных уравнений (19) с начальными условиями (20) решается методом Рунге-Кутты 4-го порядка точности с автоматическим выбором шага.

После вычисления координат осколков в стартовой системе координат определяются их координаты в земной системе координат. Плотность осколочного потока (рис. 15) на поверхности земли с учетом скорости, высоты и угла подрыва снаряда определяется на основе рассчитанных траекторий движения осколков.

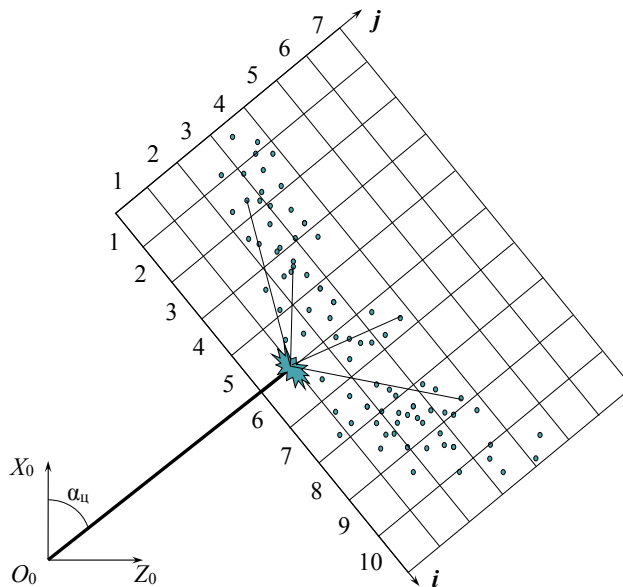


Рис. 15. Область разлета осколков после срабатывания снаряда

По результатам моделирования плотности осколочного потока определяется зона поражения. Более детальное описание алгоритма построения зон поражения с учетом рельефа местности, на основе многократного имитационного моделирования разлета осколков, представлено в работе [24].

4. Разработка программного комплекса

В рамках разрабатываемого подхода к проектированию и отработки стрелково-пушечного вооружения создан программный комплекс моделирования и визуализации процессов артиллерийского выстрела. Структура программного комплекса представлена на рис. 16.

Разработанный программно-вычислительный комплекс имеет открытую архитектуру и позволяет взаимодействовать с внешними приложениями, которые разделены на три группы: геоинформационные системы, системы 3D моделирования и проектирования, системы компьютерного инженерного моделирования.



Рис. 16. Структура программного комплекса моделирования и визуализации баллистических процессов

Геоинформационные системы предназначены для предобработки картографической информации, которая первоначально может иметь различный формат данных. После предобработки картографической информации в одной из геоинформационных систем, например, в QGIS или Global Mapper, данные о земной поверхности импортируются в редактор карт.

Системы 3D моделирования и проектирования позволяют значительно упростить построение геометрических примитивов, необходимых при создании объектов моделирования и визуализации. Геометрические примитивы, разработанные в САПР Компас 3D, после наложения текстур в среде 3D Studio MAX импортируются в редактор объектов в форматах OBJ или FBX.

Моделирование полигональных испытаний артиллерийских систем осуществляется в расчетных модулях: внутренней баллистики, внешней баллистики, конечной баллистики и измерительной аппаратуры.

Расчетные модули создавались в средах Qt Creator и MS Visual Studio на языках программирования C++ и C#. Программный комплекс конфигурации и визуализации полигонных испытаний создан с использованием среды разработки 3D приложений NeoAxis Engine. Наиболее трудоемкие расчеты проводились в системах инженерного компьютерного моделирования, например, моделирование взаимодействия снаряда с преградой в ЛОГОС Прочность и ANSYS Autodyn, а расчет обтекание снаряда в ЛОГОС Аэрогидромеханика и ANSYS Fluent.

Основное окно пользовательского интерфейса программного комплекса представлено на рис. 17.

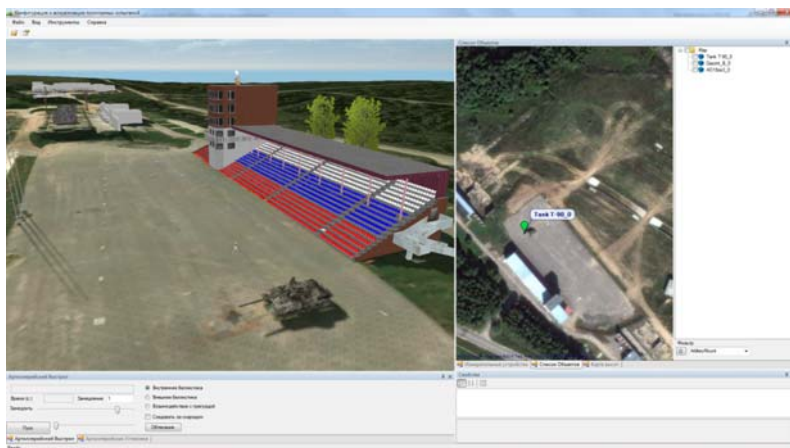


Рис. 17. Программный комплекс конфигурации и визуализации полигонных испытаний

5. Результаты моделирования баллистических процессов выстрела

5.1. Результаты моделирования внутренней баллистики

Разработанное программное обеспечение способно предоставить самую разнообразную числовую и графическую информацию о внутрибаллистическом процессе выстрела, проводить параметрические исследования и оценивать влияние конструкции заряда на баллистику выстрела (см. [5 – 11]).

Элементы программного комплекса автоматизации обработки и визуализации результатов моделирования внутренней баллистики приведены на рис. 18.

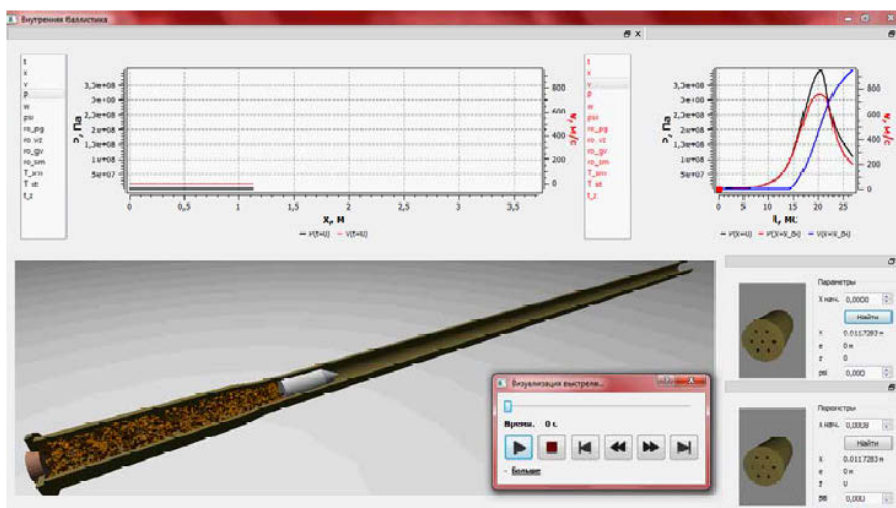


Рис. 18. Визуализация внутрибаллистического процесса для орудия калибра 152 мм с зарядом из зернового пороха в эйлеровой системе координат

5.2. Результаты моделирования внешней баллистики

При решении задачи внешней баллистики рассматривались снаряды различной формы: бронебойно-подкалиберный снаряд калибра 125 мм; осколочно-фугасный оперенный снаряд калибра 125 мм и осколочно-фугасный вращающийся снаряд калибра 152 мм (см. рис. 10).

На рис. 19 представлены зависимости коэффициента лобового сопротивления C_x от числа Маха для рассматриваемых снарядов, а также зависимости, построенные по законам сопротивления 1943 г. и 1958 г. [14]. Наблюдается качественное и количественное соответствие расчетных зависимостей с законами сопротивления 1943 г. и 1958 г. При этом в диапазоне чисел Маха, соответствующих движению осколочно-фугасных снарядов по траектории ($0,5 < M < 3,0$), расхождение кривых составляет 5 – 12 %, в соответствующем диапазоне для бронебойно-подкалиберного снаряда ($3,0 < M < 5,0$) расхождение кривых составляет 7 – 10 %.

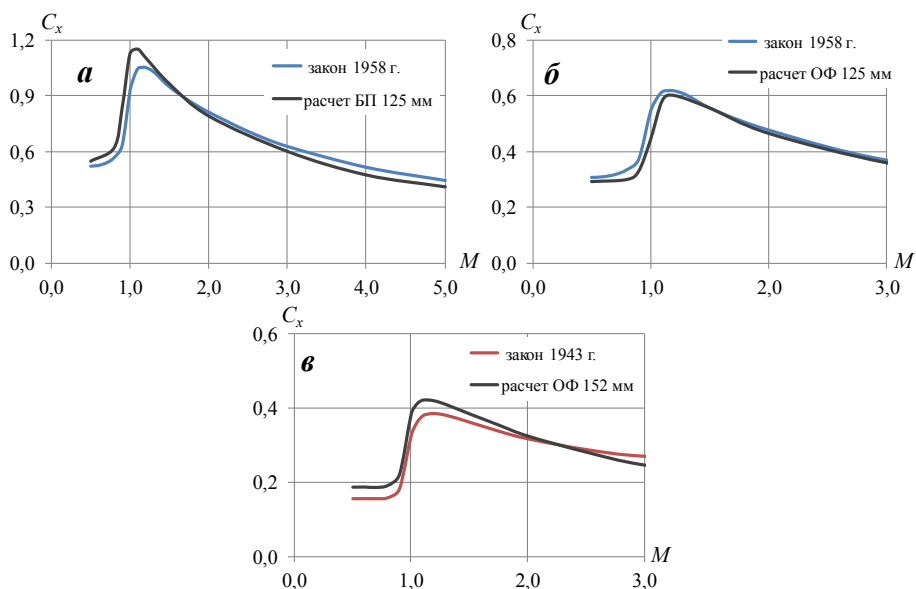


Рис. 19. Зависимости коэффициента лобового сопротивления C_x от числа Маха: *a* – для БП снаряда калибра 125 мм; *б* – для ОФ оперенного снаряда калибра 125 мм; *в* – для ОФ вращающегося снаряда калибра 152 мм

В табл. 1 представлены результаты сравнения координат точек падения осколочно-фугасного оперенного снаряда калибра 125 мм, полученные расчетным путем и в ходе проведения эксперимента (ФКП “НИИ “Геодезия”).

Таблица 1

Сравнение координат точек падения снарядов

Номер точки падения	Определение точек падения снаряда	Координаты		Среднеквадратическое отклонение, м
		x , м	z , м	
1	В эксперименте 1	11657	6,1	-
2	В эксперименте 2	11802	- 8,2	-
3	В эксперименте 3	11745	88,1	-
4	В эксперименте 4	11890	74,7	-
5	В расчете по закону 1958 г.	11653	67,2	123,5
6	В расчете по разработанной методике	11752	54,5	25,8

На рис. 20 представлено распределение точек падения снарядов на полигоне (номера и координаты точек представлены в табл. 1). Сравнение отклонения расчетных точек падения снаряда, от положения средней точки падения, полученной в эксперименте (обозначена крестиком), показывает, что наилучшее соответствие с экспериментом наблюдается в расчете по разработанной методике.

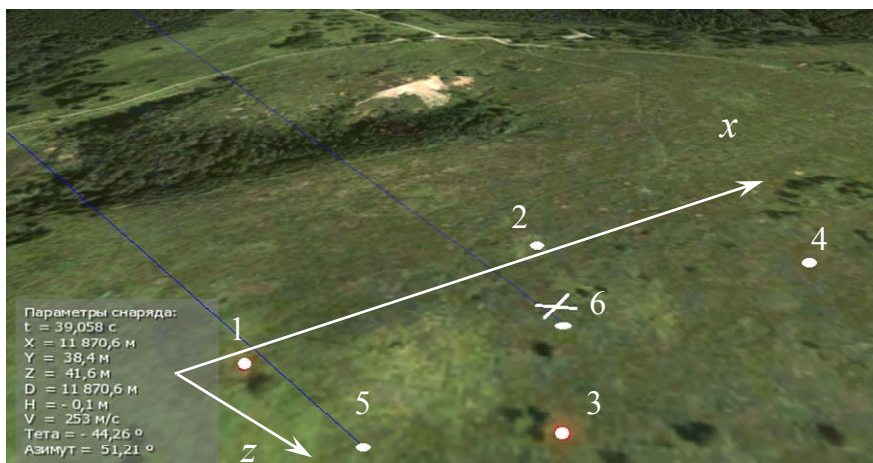


Рис. 20. Распределение точек падения снарядов на полигоне

5.3. Результаты моделирования конечной баллистики

5.3.1. Результаты моделирования процесса бронепробития

Комплексное моделирование артиллерийского выстрела учитывает связь между последовательными этапами процесса [25]: внутренняя баллистика, внешняя баллистика и конечная баллистика.

Рассмотрим некоторые результаты параметрического исследования влияния диаметра сердечника бронебойно-подкалиберного снаряда на глубину пробития. Сердечник изготавливается из материала высокой плотности, например, вольфрамового сплава, соответственно с увеличением диаметра сердечника общая масса снаряда также увеличивается. Когда активная часть снаряда полностью состоит из стали, то снаряд будет иметь наименьшую массу, а в случае вольфрамового сплава – наибольшую массу.

Ограничениями для внутренней баллистики могут служить заданное значение максимальное давление внутри ствола или у дна снаряда, для обеспечения нормального функционирования артиллерийской системы. Ограничением для внешней баллистики является устойчивое движение снаряда на рассматриваемом участке траектории.

Для штатного заряда в разработанном модуле внутренней баллистики были рассчитаны дульные скорости движения 125 мм бронебойно-подкалиберного снаряда с различными диаметрами вольфрамового сердечника. На основе дульных скоростей и углов вылета снаряда были определены траектории движения и скорости подлета снаряда к преграде с учетом различных массовых характеристик.

Задача бронепробития решалась в программе ANSYS Autodyn в осесимметричной постановке. Рассматривались два варианта расчета: пробитие конечной и полубесконечной преград [25].

На рис. 21 представлены результаты расчета действия однородного стального снаряда по бронеplate толщиной 440 мм. В данном случае имеет место застревание снаряда. В случае использования однородного снаряда из вольфрамового сплава при тех же условиях заряжания наблюдается пробитие преграды (рис. 22).

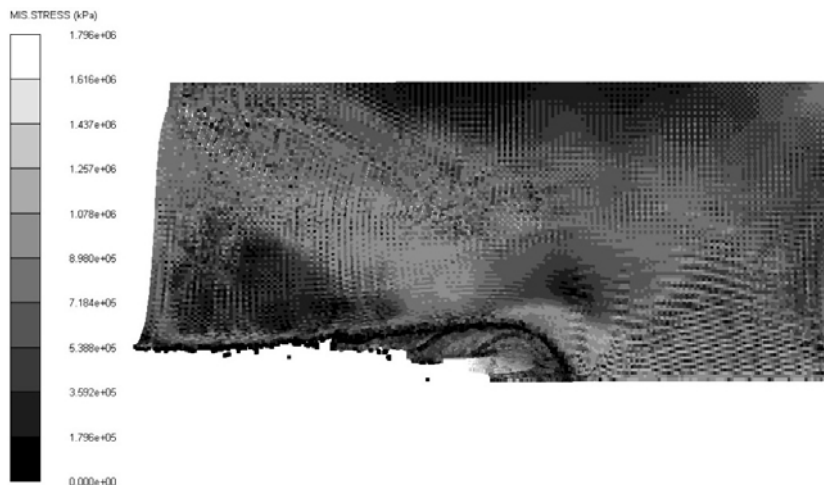


Рис. 21. Характер взаимодействия однородного стального снаряда с преградой

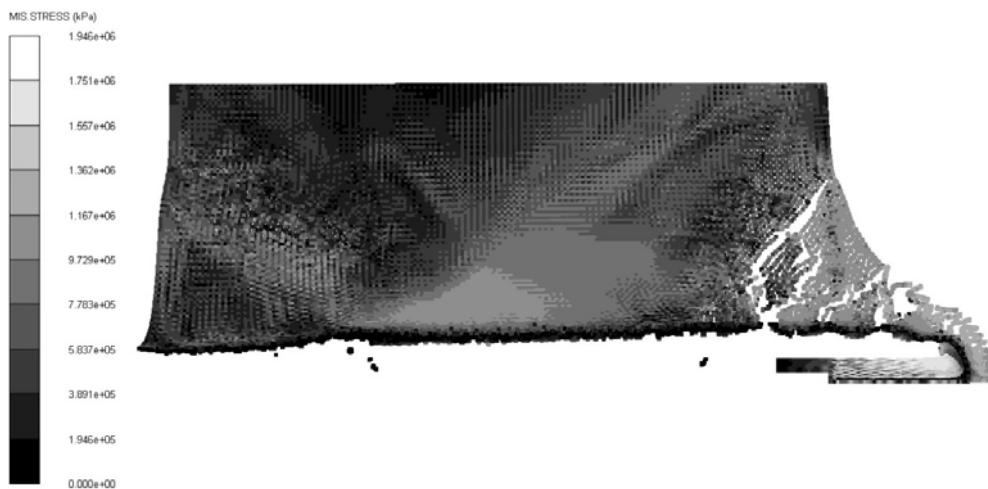


Рис. 22. Характер взаимодействия однородного снаряда из вольфрамового сплава с преградой

Сравнительный анализ зависимостей глубины пробития от массы снаряда в случае полубесконечной и конечной преграды представлен на рис. 23.

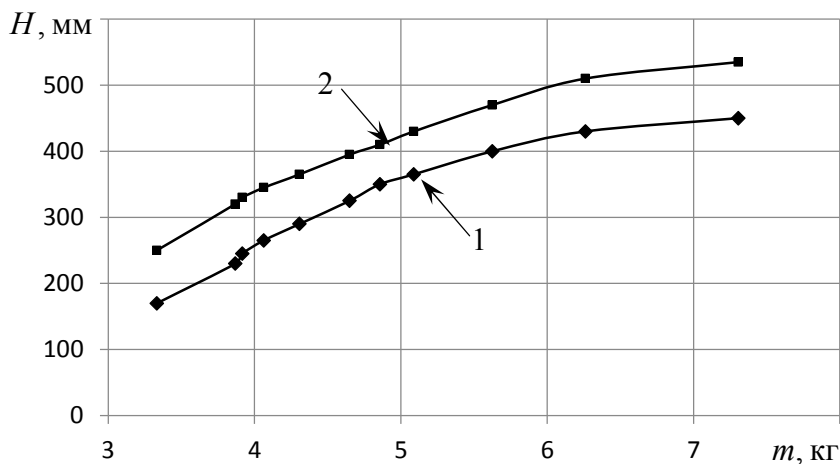


Рис. 23. Глубина пробития полубесконечной (1) и конечной (2) преграды в зависимости от массы снаряда

Из расчетов следует, что при одинаковых условиях заряжания проникающая способность снаряда возрастает с увеличением его массы, зависящей от диаметра вольфрамового сердечника, при этом отличие результатов расчета по глубине проникновения снаряда для полубесконечной и конечной преград составляет $\sim 20 - 50 \%$.

5.3.2. Результаты моделирования осколочного действия снаряда с учетом рельефа местности

В программном комплексе предусмотрено построение траектории разлета поражающих элементов (рис. 24). Траекторные кривые строятся до момента встречи осколков с поверхностью земли, либо до момента, когда их кинетическая энергия становится меньше критического значения, необходимого для поражения незащищенной живой силы [26].

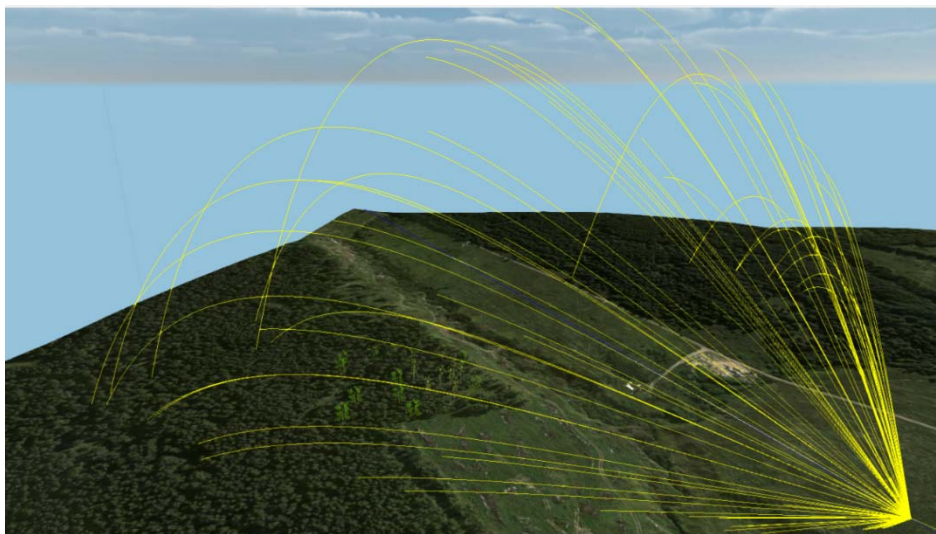


Рис. 24. Траектории разлета осколков при подрыве 125 мм ОФ оперенного снаряда

На рис. 25 представлена расчетная область поражения осколками 125 мм ОФ оперенного снаряда.

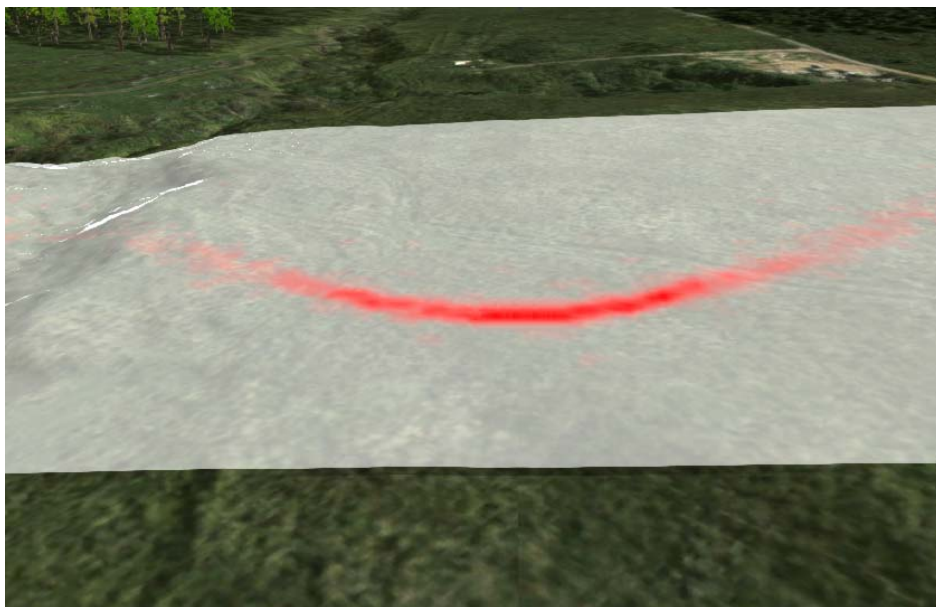


Рис. 25. Плотность осколочного потока и зона поражения осколками 125 мм ОФ оперенного снаряда

Результаты моделирования осколочного поля накладываются на рельеф местности. Как видно из рис. 25, основная масса осколков сосредоточена вблизи подрыва снаряда. Для снаряда цилиндрической формы область поражения имеет дугообразную форму, что совпадает с результатами натурных экспериментов. Такая дугообразная форма плотности осколочного поля объясняется наличием продольной составляющей скорости движения снаряда и высокой скоростью разлета осколков в радиальном направлении.

6. Результаты моделирования работы измерительной аппаратуры при проведении полигонных испытаний

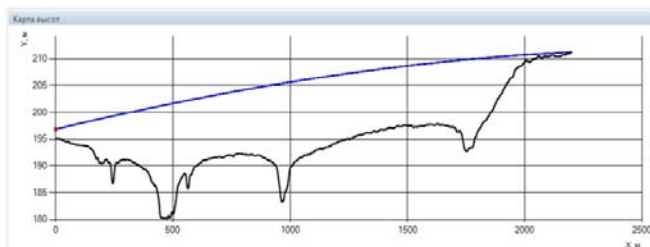
Разработанный программный комплекс позволяет визуализировать результаты вычислительного и натурального экспериментов на виртуальной карте полигона, а также отображать их в виде графиков и в табличном виде. Пример визуализации результатов моделирования в программном комплексе представлен на рис. 26.



а) отображение траектории движения снаряда на виртуальном полигоне



б) вид снаряда из виртуального измерительного устройства



в) траектория движения снаряда с учетом рельефа



г) виртуальная карта полигона

Рис. 26. Визуализация результатов моделирования внешнебаллистической траектории снаряда в программном комплексе

В виртуальную систему полигонных испытаний входит программный блок моделирования работы измерительно-регистрирующей аппаратуры, назначение которого является расчет параметров функционирования технических средств регистрации, обеспечивающих сопровождение снаряда на всем протяжении его движения по внешнебаллистической траектории и локализации точек падения снаряда на реальном рельефе местности. На рис. 27 представлен пример слежения за снарядом из мобильной оптико-электронной системы (МОЭС) «Вереск-М» на виртуальном полигоне.

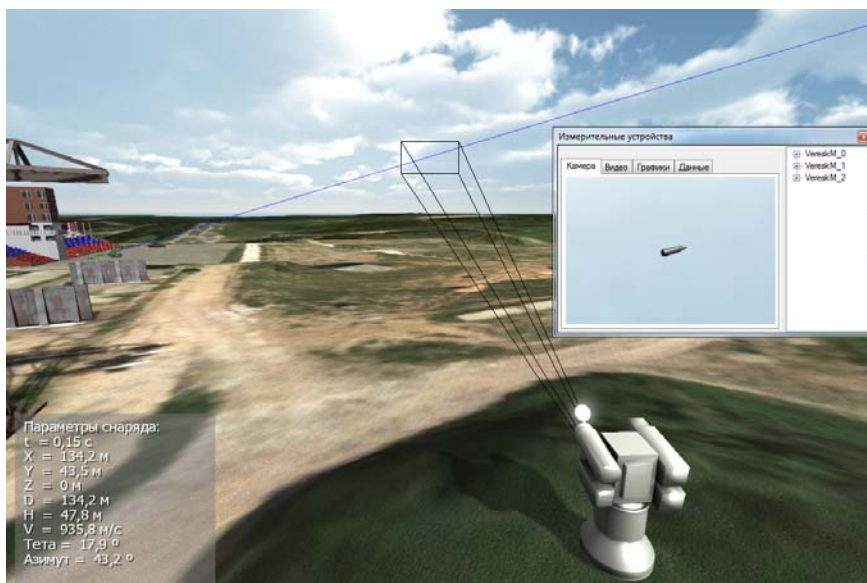


Рис. 27. Обзор из МОЭС «Вереск-М»

Моделирование работы измерительно-регистрирующей аппаратуры осуществляется на основе расчетных внешнебаллистических траекторий снаряда. Преобразование координаты траектории снаряда из стартовой системы координат $(Ox_c y_c z_c)$ в земную систему $(O'x_3 y_3 z_3)$ относительно точки старта снаряда (x_0, y_0, z_0) производится по формулам [27]:

$$\begin{aligned} x_3(t) &= x_0 + x_c(t) \cos(\alpha) - z_c(t) \sin(\alpha), \\ y_3(t) &= y_0 + y_c(t), \\ z_3(t) &= z_0 + x_c(t) \sin(\alpha) + z_c(t) \cos(\alpha). \end{aligned} \quad (21)$$

Слежение за снарядом осуществляется за счет опорно-поворотного механизма. Расчет параметров вращения опорно-поворотного механизма, расположенного в точке (x_y, y_y, z_y) земной системы координат, осуществляется по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \varphi_y(t) &= \text{azimuth}(z_3(t) - z_y, x_3(t) - x_y), \\ \theta_y(t) &= \arctan \left(\frac{y_3(t) - y_y}{\sqrt{(x_3(t) - x_y)^2 + (z_3(t) - z_y)^2}} \right), \\ D_y(t) &= \sqrt{(x_3(t) - x_y)^2 + (y_3(t) - y_y)^2 + (z_3(t) - z_y)^2}, \end{aligned} \quad (22)$$

где $\varphi_y(t)$ – азимут поворота измерительно-регистрирующего устройства, град; $\theta_y(t)$ – угол места измерительно-регистрирующего устройства, град; $D_y(t)$ – дальность от измерительно-регистрирующего устройства до снаряда, м. Угловые скорости и ускорения поворота устройства определяются как первые и вторые производные от соответствующих углов по времени.

На рис. 28 представлен пример расчета расстояний от движущегося снаряда $D_y(t)$ до измерительных устройств МОЭС «Вереск-М», расположенных в начале (1), в середине (2) и в конце (3) траектории снаряда.

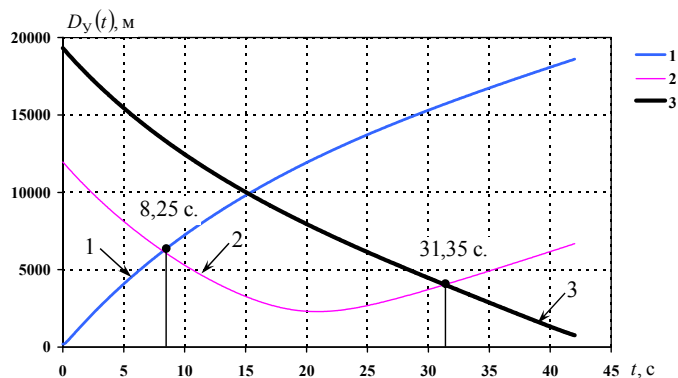


Рис. 28. Расстояние до снаряда от МОЭС «Вереск-М», расположенных в трех точках: 1 – в начале траектории; 2 – в средней части траектории; 3 – в конце траектории

Результаты, представленные на графике (см. рис. 28), можно использовать для определения оптимального времени функционирования каждого из МОЭС «Вереск-М», исходя из минимального расстояния до снаряда от соответствующих позиций устройств. В данном случае имеем: 1-е устройство фиксирует снаряд в период $0,00 \leq t \leq 8,25$ с; 2-е устройство – в период $8,25 < t \leq 31,35$ с; 3-е устройство – в период $31,35 < t \leq 42,00$ с.

Выводы

1. Разработана комплексная физико-математическая модель процесса артиллерийского выстрела, включающая процессы воспламенения, горения порохового заряда, напряженно-деформированного состояния ствола артиллерийского орудия, движение снаряда по внешнебаллистической траектории с учетом аэродинамической стабилизации, пробитие преград артиллерийскими бронебойно-подкалиберными снарядами или разлет осколков при подрыве осколочно-фугасного снаряда на траектории.

2. Разработана и реализована структурно-функциональная модель системы визуализации процессов, сопровождающих артиллерийский выстрел.

3. Создана виртуальная система полигонных испытаний, включающая цифровую модель карты полигона с элементами инфраструктуры, объекты испытаний и измерительно-регистрирующего комплекса.

4. Разработана система имитационного моделирования измерительно-регистрирующих устройств для определения координат позиционирования и параметров функционирования измерительно-регистрирующей аппаратуры при фиксации внешнебаллистических траектории артиллерийских снарядов.

5. Разработан программно-вычислительный комплекс конфигурации и визуализации полигонных испытаний для анализа, оптимизации, принятия управленческих решений на основе обработки информации по результатам моделирования процесса артиллерийского выстрела.

Проведенные исследования и разработки могут служить основой создания специализированного вычислительного модуля для решения комплекса задач проектирования и отработки стрелково-пушечного вооружения.

Литература

1. Система трехмерного моделирования САПР КОМПАС-3D [Электронный ресурс] / АСКОН. 1989-2018. – Режим доступа: <https://kompas.ru>.

2. Пакет программ инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования ЛОГОС [Электронный ресурс] / РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2017 – 2018. – Режим доступа: <http://logos.vniief.ru>.

3. Qt Cross-platform software development for embedded & desktop [Электронный ресурс] / The Qt Company. 2018. – Режим доступа: <https://www.qt.io>.
4. Суфиянов В. Г. Решение задачи комплексного моделирования артиллерийского выстрела с применением визуальных технологий для проектирования и отработки артиллерийских систем: Дис. ... доктора технических наук. – Ижевск, 2017.
5. 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.
6. Русяк И. Г., Липанов А. М. Исследование сопряженного тепломассообмена при воспламенении и последующем нестационарном эрозионном горении порохов в условиях, приближенных к условиям выстрела // Инженерно-физический журнал. – 2016. – Т. 89, № 6. – С. 1553 – 1563.
7. Rusyak I., Sufiyarov V., Korolev S., Ermolaev M. Software Complex for simulation of Internal and external Ballistics of Artillery Shot // ICMT 2015 – International Conference on Military Technologies 2015 5. 2015. – P. 7153682.
8. 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.
9. 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 // XXIII Семинар по струйным, отрывным и нестационарным течениям: сб. докл. – Томск: Изд-во НИТПУ, 2012. – С. 305 – 309.
10. Русяк И. Г. К вопросу о постановке сопряженных задач газовой динамики и горения артиллерийских порохов // VII Всероссийская научная конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики»: сб. докл. – Томск: Изд-во НИТГУ, 2011. – С. 181 – 183.
11. Русяк И. Г. Математические модели проектирования боеприпасов на основе уравнений механики гетерогенных реагирующих сред // Вопросы оборонной техники. Серия 14. Проектирование систем вооружения, боеприпасов и измерительных комплексов. – 2011. – № 2. – С. 3 – 11.
12. Тененев В. А., Русяк И. Г., Горохов М. М. Численное исследование частиц алюминия в двухфазном потоке // Математическое моделирование. – 1997. – Т. 9, № 5. – С. 87 – 96.
13. Горохов М. М., Русяк И. Г. Моделирование эрозионного горения гранулированного топлива // Физика горения и взрыва. – 2001. – Т. 37, № 3. – С. 76 – 82.
14. Дмитриевский А. А., Лысенко Л. Н. Внешняя баллистика. – М.: Машиностроение, 2005.
15. Королев С. А., Липанов А. М., Русяк И. Г. К вопросу о точности решения прямой задачи внешней баллистики // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2017. – № 47. – С. 63 – 74. DOI: 10.17223/19988621/47/7.
16. Hairer E., Norsett S. P., Wanner G. Solving Ordinary Differential Equations. V. 1. – Berlin: Springer – Verlag, 1991.
17. Королев С. А., Карсканов С. А. Математическое моделирование обтекания тела вращения сверхзвуковым потоком газа // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. – 2014. – № 3. – С. 123 – 133.
18. Русяк И. Г., Карпов А. И., Королев С. А., Карсканов С. А. Расчет траектории движения снаряда в атмосфере с учетом гидродинамики его обтекания // Вопросы оборонной техники. Серия 14. – 2015. – № 2. – С. 130 – 140.
19. Engineering simulation & 3D design software [Electronic resource] / ANSYS, Inc. 2018. – Mode of access: <https://www.ansys.com>.
20. Липанов А. М., Вахрушев А. В., Федотов А. Ю. Исследование динамического взаимодействия твердых тел методами математического моделирования // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. – 2015. – Т. 8, № 1. – С. 53 – 65.
21. Johnson G. R., Cook W. H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures // Proc. of 7 th Symposium on Ballistics, Hague, Netherlands, 1983. – P. 541 – 547.

22. Физика взрыва / под ред. Л. П. Орленко. – Т. 1. – М.: Физматлит, 2004.
23. Никулин Е. Н. Оценка эффективности действия бронебойных подкалиберных и осколочных снарядов на базе вычислительного эксперимента. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2010.
24. 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.
25. Липанов А. М., Русяк И. Г., Суфиянов В. Г. Результаты комплексного математического моделирование процесса бронепробития // IX Всероссийская конференция «Внутрикамерные процессы и горение в установках на твердом топливе и ствольных системах» (ICOC'2017): сб. докл. Ижевск, 2017. – С. 168 – 179.
26. Балаганский И. А., Мерзиевский Л. А. Действие средств поражения и боеприпасов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004.
27. 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. – 2016. – № 4 (31). – С. 116 – 119.

DEVELOPMENT OF A SPECIALIZED COMPUTING MODULE FOR SOLVING THE COMPLEX OF PROBLEMS OF GUN ARMAMENT DESIGNING AND WORKING OUT

A. M. Lipanov¹, I. G. Rusyak², V. G. Sufiyonov², S. A. Korolev²

¹Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, Moscow

²Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk

Design, creation and testing of new artillery systems and highspeed throwing systems require a significant amount of expensive experimental research and experimental work. The development of a new approach to the design of artillery systems related to the detailing of artillery shot processes and the use of effective computational algorithms in conjunction with the capabilities of modern computers allows us to put the methods of numerical research on a par with field experiments. The advantages of this approach include a significant increase in informativity in modeling, quick adjustment of the model to a new object of the class under study and the ability to analyze various physical effects, as well as the possibility of optimizing the parameters of a shot and improving the tactical and technical characteristics of artillery systems based on imitation experiments.

The article is devoted to the development of software and computational complex for computer modeling and visual display of various stages of the artillery shot process. The complex mathematical model of artillery shot process includes the processes of internal, external and final ballistics.

Internal ballistic processes are described on the basis of the gas and dynamic model of heterogeneous media motion. The main task of internal ballistics is considered for charges consisting of granular and tubular powder elements, taking into account their gradual ignition, non-stationary erosion burning and stress-strain state.

External ballistic processes are described by a system of differential equations of a rigid body motion with allowance for aerodynamic and gyroscopic stability. A method has been created for determining the full set of aerodynamic forces and moments coefficients based on solving the problem of hydrodynamic flow past a projectile.

Mathematical models of final ballistic processes – armor penetration and fragment distribution – are presented. The problem of armor penetration is considered on the basis of relations describing the motion of a compressible elastoplastic medium. The problem of fragment distribution is solved on the basis of a simulation of the particles motion with initial conditions determined from the physical characteristics of

explosives and the shell material of the projectile. The movement of the fragments is described by a system of differential equations.

Comprehensive physical and mathematical model of an artillery shot is implemented as a software and computer complex which includes a configuration and visualization module for field testing, intended to display a digital model of a landfill, results of modeling a process of artillery shot and the operation of measuring and recording devices.

The developed computer technologies of complex mathematical modeling of the artillery shot process allow solving the problems of automating the processes of designing artillery guns and ammunition, increase the information content and productivity of work on polygon during the development of artillery systems.

Keywords: artillery shot, internal ballistics, external ballistics, final ballistics, mathematical modeling, design, software and computer complex, computational experiment, field testing, visualization.

УДК 004.4

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ ЗАДАЧ ПРОЧНОСТИ В ПАКЕТЕ ПРОГРАММ ЛОГОС

А. И. Лопаткин, В. В. Журнов, Д. С. Кондратьев, В. В. Ломтев, Е. В. Нестеров

Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров

В докладе приводится описание новых возможностей параллельной системы постобработки ScientificView. Реализованные возможности предназначены преимущественно для обработки результатов моделирования, полученных программным модулем пакета программ «ЛОГОС» для моделирования задач прочности. Однако часть разработанных алгоритмов является универсальной и может использоваться при проведении постобработки результатов, полученных прочими решателями.

Ключевые слова: Пакет программ ЛОГОС, параллельная система постобработки ScientificView, постобработка, прочность.

Введение

Пакет программ инженерного анализа «ЛОГОС» предназначен для решения трехмерных задач аэро-, гидродинамики, тепломассопереноса и прочности на супер-ЭВМ. В качестве средства постобработки результатов инженерных расчетов, проводимых по пакету программ «ЛОГОС», выступает параллельная система постобработки ScientificView [1], [2]. Система ScientificView предназначена для фильтрации, отображения, числового анализа результатов моделирования физических процессов на сетках регулярного и нерегулярного типа, а также для обработки данных, полученных бессеточными методами моделирования (частицы, молекулы, кластеры).

Наряду с классическими алгоритмами обработки данных в ScientificView имелся достаточно большой набор и специализированных алгоритмов. Однако для постобработки результатов моделирования, полученных программным модулем для моделирования задач прочности ЛОГОС-