

УДК 004.942, 623.522

В. Г. Суфиянов, кандидат физико-математических наук
С. А. Королев, кандидат физико-математических наук
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

КОМПЛЕКСНАЯ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АРТИЛЛЕРИЙСКОГО ВЫСТРЕЛА

В статье представлено описание комплексной физико-математической модели артиллерийского выстрела, которая включает описание процессов внутренней и внешней баллистики, а также функционирования снаряда у цели. В рамках разработанной комплексной физико-математической модели рассматривается вопрос моделирования процесса функционирования измерительно-регистрирующих устройств на виртуальном испытательном полигоне.

Ключевые слова: комплексная физико-математическая модель, артиллерийский выстрел, моделирование измерительно-регистрирующих устройств, виртуальный испытательный полигон.

Проведение полигонных испытаний при отработке артиллерийских систем позволяет оценить соответствие их характеристик заявленным техническим характеристикам. Наиболее важной характеристикой артиллерийской системы является эффективность действия снаряда у цели, которая обеспечивается правильным функционированием снаряда на всей траектории движения. Комплексное моделирование полигонных испытаний, включая функционирования измерительно-регистрирующих устройств, позволяет качественно подготовить проведение натурных испытаний и зафиксировать все этапы артиллерийского выстрела.

Процесс моделирования полигонных испытаний артиллерийских систем можно разбить на стадии, которые выполняются последовательно в установ-

ленном порядке. Комплексная математическая модель позволяет описать все основные процессы, протекающие при выстреле: внутри- и внешнебаллистические процессы, процессы функционирования снаряда у цели. На рис. 1 приведена последовательность моделирования различных стадий проведения полигонных испытаний.

Анализ работ [1–10] показывает, что рассматриваемые явления носят существенно нелинейный и нестационарный характер. Адекватное представление особенностей сложных явлений артиллерийского выстрела требует применения соответствующих физико-математических моделей, которые описываются системой трехмерных сопряженных динамических интегро-дифференциальных уравнений.

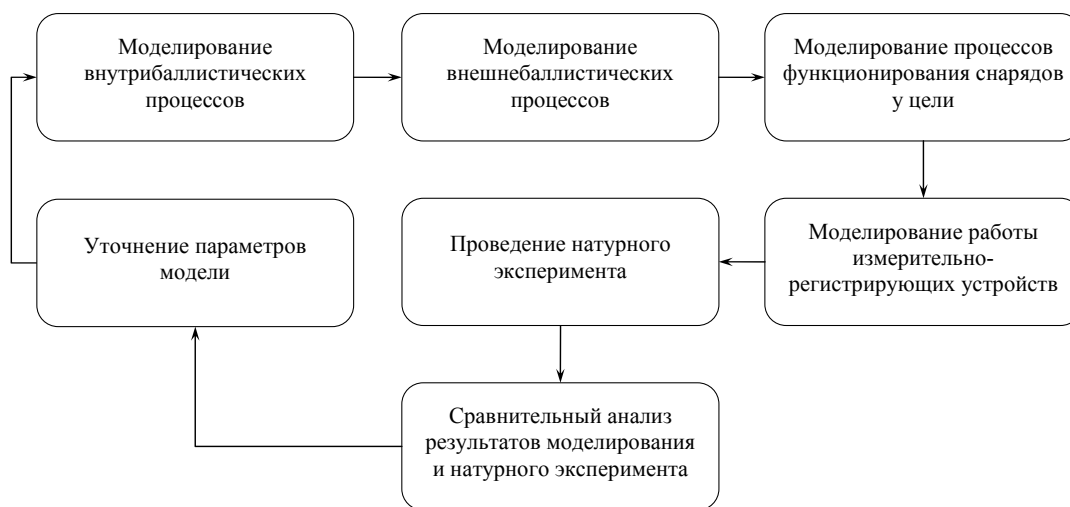


Рис. 1. Постадийная схема процесса моделирования полигонных испытаний артиллерийских систем

Внутренняя баллистика

Внутрибаллистический процесс рассматривается с позиции механики гетерогенных реагирующих сред в рамках газодинамического подхода и представляет собой сложный комплекс явлений, таких как прогрев, воспламенение, движение газопороховой смеси и неравномерное нестационарное эрозивное горение пороховых элементов заряда под влиянием обдува [11, 12]. Моделирование процесса горения пороха осуществляется с использованием твердофазной локальной модели горения. Алгоритм

решения основан на численном интегрировании уравнений гидромеханики в газовой фазе и уравнений теплопроводности и глубины выгорания в конденсированной фазе в зоне горения пороха.

Решение основной задачи внутренней баллистики осуществляется в разработанном авторами [13, 14] программном комплексе в среде программирования Qt на языке C++.

Исходными данными для моделирования внутрибаллистического процесса являются геометрические, теплофизические и энергетические характери-

стики зарядов, снарядов и ствола артиллерийской установки.

Результатом моделирования является динамика изменения в заснарядном пространстве давления, температура смеси газов, температура поверхности горения пороха, концентрация пороховых элементов заряда и др.

Внешняя баллистика

На стадии моделирования внешнебаллистических процессов проводится расчет траектории движения снаряда с учетом начальных условий стрельбы и метеоусловий (температуры, давления, скорости и направления ветра). Методика расчета траекторий полета основывается на решении системы дифференциальных уравнений движения снаряда [15].

В методике предусмотрено два варианта задания коэффициентов аэродинамического сопротивления: на основе эмпирических законов сопротивления воздуха 1943 г. и 1958 г. и задаваемых коэффициентов формы; на основе аппроксимационных зависимостей, полученных при обработке данных численного решения задачи внешнего обтекания снаряда [16, 17]. Результатом моделирования является динамика изменения распределения параметров внешнебаллистического процесса с течением времени, такие как дальность в плоскости стрельбы, высота, боковое отклонение, аксиальная угловая скорость, угол наклона и угол пути.

Функционирование снаряда у цели

Взаимодействие снаряда с объектом поражения реализовано в двух расчетных блоках: бронепробития и осколочного действия. Первый расчетный блок относится к бронебойным снарядам. Начальными условиями здесь являются результаты моделирования внешней баллистики, а именно: скорость и угол подлета. Решение задачи бронепробития также реализовано с использованием программного комплекса ANSYS Autodyn [18]. Математическая модель динамического взаимодействия и разрушения двух тел представлена в работах [19–21]. В работе используется модель текучести Джонсона – Кука [22] и уравнения состояния материалов Мю – Грюнайзена.

Результатом моделирования процесса бронепробития является динамика изменения распределения параметров тела с течением времени, такие как тензоры напряжений и скорости деформаций, плотность, температура, смещение по координатам и др.

Второй блок расчета функционирования снаряда у цели относится к осколочно-фугасным снарядам. Расчет осколочного потока при срабатывании снаряда на траектории с использованием технологии имитационного статистического моделирования выполнен авторами [23]. Алгоритм моделирования основан на расчете траектории движения осколков. Начальная скорость и спектр масс осколков вычисляются из физических характеристик материала оболочки снаряда, взрывчатого вещества и продуктов детонации. Направление и скорость движения осколков зависят от линейной и радиальной скорости снаряда.

В результате проведения имитационного моделирования получаем точки падения и скорость оскол-

ков. На основе этих данных определяется плотность осколочного потока и зона поражения.

Функционирование измерительно-регистрирующей аппаратуры

Комплексная физико-математическая модель артиллерийского выстрела используется для моделирования полигонной обстановки при отработке артиллерийских систем. Одной из задач при проведении полигонных испытаний является обеспечение адекватного функционирования измерительно-регистрирующей аппаратуры.

Номенклатура приборов измерения параметров объектов испытаний (давление, скорость, вибрация и т. п.) весьма обширна [24] и обладают характерными свойствами и ограничениями. В качестве примера рассмотрим моделирование опорно-поворотного устройства [25] малогабаритной оптико-электронной станции «Вереск» (МОЭС «Вереск») [26], которая позволяет определять дальность до исследуемых объектов и регистрировать видеоинформацию. Основные технические ограничения [27] МОЭС «Вереск» представлены в таблице.

Характеристики опорно-поворотного устройства МОЭС «Вереск»

Параметр	Значение
Диапазон углов вращения по азимуту: по углу места:	Без ограничений –10°...+185°
Максимальная угловая скорость по азимуту: по углу места:	100°/с 30°/с
Максимальная угловая скорость по азимуту: по углу места:	120°/с ² 30°/с ²

В разработанном программном комплексе трехмерной визуализации результатов вычислительного и натурного экспериментов [28] были созданы виртуальные модели измерительных устройств (рис. 2).

Моделирование углов вращения опорно-поворотных устройств измерительно-регистрирующего прибора осуществляются по азимуту

$$\varphi(t) = \arctg \left(\frac{X(t) - X_p}{|Z(t) - Z_p|} \right)$$

и по углу места

$$\theta(t) = \arctg \left(\frac{Y(t) - Y_p}{\sqrt{(X(t) - X_p)^2 + (Z(t) - Z_p)^2}} \right),$$

где X_p, Y_p, Z_p – координаты точки стояния средства измерения; $X(t), Y(t), Z(t)$ – координаты траектории движения объекта испытаний.

Оптические измерительные приборы моделируют положение камер и позволяют следить за движением снаряда в соответствии с положением снаряда либо по заданной программе. Пример отображения результатов моделирования МОЭС «Вереск» представлен на рис. 3.

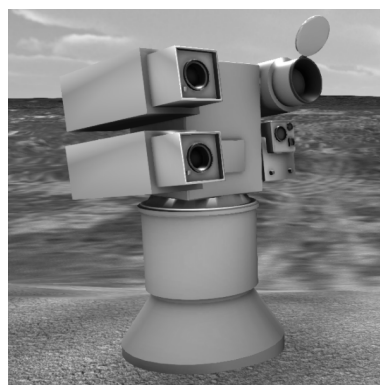


Рис. 2. Фотография и виртуальная модель МОЭС «Вереск»

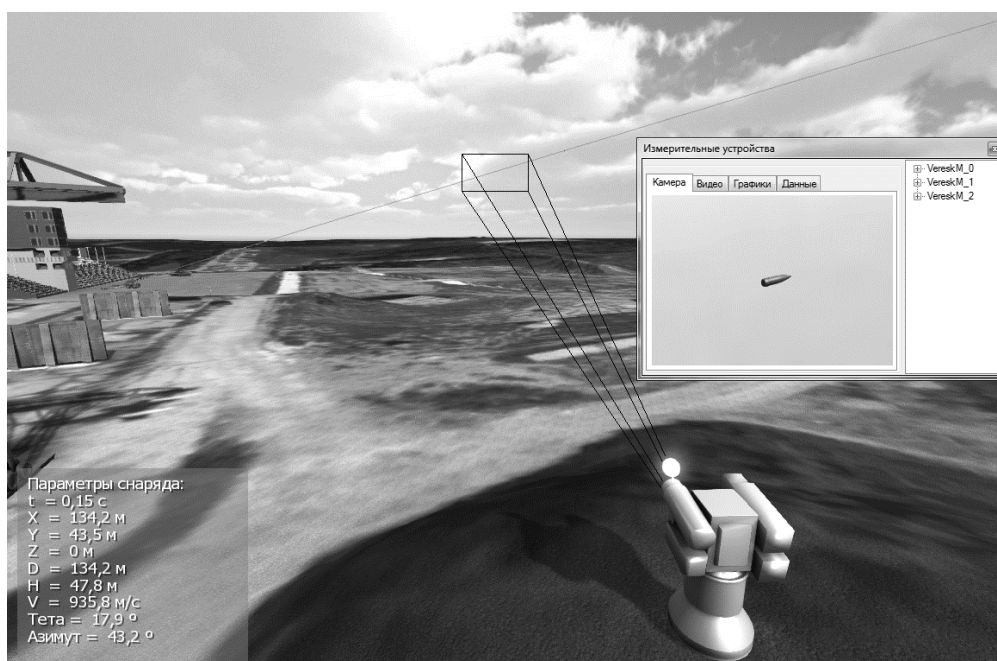


Рис. 3. Результаты моделирования МОЭС «Вереск»

По результатам моделирования вычисляются угловые характеристики, а также скорость и ускорение вращения опорно-поворотных устройств. Превышение этих показателей значений, представленных в таблице, означает необходимость изменения расположения приборов либо замены на другой более быстродействующий прибор. Анализ визуального представления результатов моделирования, полученного в программном комплексе, позволяет определить возможность фото- и видеофиксации объекта испытания.

Натурный эксперимент

На этом этапе происходят натурные испытания артиллерийских систем для оценки внутрибаллистических параметров и внешнебаллистических траекторий. Данные поступают от измерительно-регистрирующих устройств и передаются в единое хранилище. После этого данные преобразуются в формат программного комплекса конфигурации и визуализации полигонных испытаний.

Сравнительный анализ и уточнение параметров модели

Информация о результатах математического моделирования и натурального эксперимента представля-

ется в виде 3D-кривой на цифровой карте полигона, в виде графиков и в табличном виде.

После сравнения результатов моделирования и натурных экспериментов определяется необходимость уточнения параметров модели. Если результаты сравнения удовлетворяют утвержденным требованиям, то процесс моделирования заканчивается. При наличии значительных расхождений между модельными и экспериментальными данными необходимо проверить исходные данные (начальные условия, параметры стрельбы и т. п.). После чего принимается решение о необходимости изменения параметров модели и повторном проведении цикла моделирования – натурального эксперимента – сравнения результатов.

Выводы

Разработана комплексная физико-математическая модель артиллерийского выстрела, которая включает описание процессов внутренней баллистики и динамического нагружения канала ствола артиллерийского орудия, внешней баллистики артиллерийского снаряда, а также функционирования снаряда у цели, а именно, процессы бронепробития и осколочного действия.

В рамках комплексной физико-математической модели артиллерийского выстрела реализован процесс моделирования функционирования измерительно-регистрирующей аппаратуры на виртуальном испытательном полигоне.

Библиографические ссылки

1. 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.
2. Серебряков М. Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. – М. : ОБОРОНГИЗ, 1962. – 705 с.
3. Орлов Б. В., Ларман Э. К., Маликов В. Г. Устройство и проектирование стволов артиллерийских орудий. – М. : Машиностроение, 1976. – 432 с.
4. Самуль В. И. Основы теории упругости и пластичности. – М. : Высш. шк., 1982. – 264 с.
5. Дмитриевский А. А., Лысенко Л. Н. Внешняя баллистика. – М. : Машиностроение, 2005. – 608 с.
6. Динамика удара / Дж. Зукас, Т. Николас, Х. Ф. Свифт и др. ; пер. с англ. – М. : Мир, 1985. – 296 с.
7. Физика взрыва / под ред. Л. П. Орленко. – Изд. 3-е, испр. – В 2 т. Т. 1. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 832 с.
8. Балаганский И. А., Мерзиевский Л. А. Действие средств поражения и боеприпасов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2004. – 408 с.
9. Методы измерений и измерительные приборы : учеб. пособие / И. А. Новиков, О. Г. Агошков, С. А. Мешков, М. Ю. Кукин – СПб. : Балт. гос. техн. ун-т, 2009. – 184 с.
10. Чемоданов Б. К. Теория и проектирование следящих приводов / Е. С. Блейз, А. В. Зимин, Е. С. Иванов и др. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. – 904 с.
11. 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.
12. Серебряков М. Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. – М. : ОБОРОНГИЗ, 1962. – 705 с.
13. 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 24.10.2016 года.
14. 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.
15. Дмитриевский А. А., Лысенко Л. Н. Внешняя баллистика. – М. : Машиностроение, 2005. – 608 с.
16. 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.
17. 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. Сер. 14. Вып. 2. – М. : НТЦ «Информтехника», 2015. – С. 130–141.
18. Autodyn Documentation. ANSYS Autodyn User's Manual. Release 15.0. ANSYS, Inc. 2013. [Электронный ресурс]. – URL: <http://148.204.81.206/Ansys/150/> (дата обращения: 16.05.2016).
19. Динамика удара / Зукас Дж., Николас Т., Свифт Х.Ф. и др. ; пер. с англ. – М. : Мир, 1985. – 296 с.
20. Липанов А. М., Вахрушев А. В., Федотов А. Ю. Исследование динамического взаимодействия твердых тел методами математического моделирования // Вестник ЮУрГУ. Сер. «Математическое моделирование и программирование». – 2015. – Т. 8; № 1. – С. 53–65.
21. Липанов А. М., Вахрушев А. В., Тенев В. А., Федотов А. Ю. Математическое моделирование динамического взаимодействия твердых тел. – Ч. 2. Моделирование физического разрушения тел // Химическая физика и мезоскопия. – 2015. – Т. 17; № 1. – С. 73–80.
22. 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 7th Symposium on Ballistics, Hague, Netherlands, 1983. P. 541-547.
23. Липанов А. М., Русяк И. Г., Тенев 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.
24. Методы измерений и измерительные приборы : учеб. пособие / И. А. Новиков, О. Г. Агошков, С. А. Мешков, М. Ю. Кукин – СПб. : Балт. гос. техн. ун-т, 2009. – 184 с.
25. Чемоданов Б. К. Теория и проектирование следящих приводов / Е. С. Блейз, А. В. Зимин, Е. С. Иванов и др. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. – 904 с.
26. Малогабаритная ОПС. ТПК «ЛИНКОС» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.linkos-tcp.ru> (дата обращения: 16.06.2016).
27. Там же.
28. Rusyak I., Sufyanov 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.

V. G. Suphiyanov, PhD (Physics and Mathematics), Kalashnikov ISTU
S. A. Korolev, PhD (Physics and Mathematics), Kalashnikov ISTU

Integrated Physical and Mathematical Model of Artillery Firing Process

The article describes the integrated physical and mathematical model of artillery firing process, which includes a description of the processes of internal and external ballistics, as well as the functioning of the projectile at the target. The modeling process of measuring and recording devices on a virtual testing ground is considered as part of an integrated physical-mathematical model.

Keywords: integrated physical and mathematical model, artillery firing process, modeling process of measuring and recording devices, virtual testing ground.

Получено: 12.09.16