

**ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И ТЕХНОЛОГИИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ
ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ВЫСОКОТОЧНЫХ БОЕПРИПАСОВ**

**BASIC PRINCIPLES AND TECHNOLOGIES USED IN THE SIMULATION
OF HIGH-PRECISION AMMUNITION**

По представлению чл.-корр. РАРАН С.А. Баканеева

Д.В. Горелов, В.А. Елисов, Д.А. Первухин

Михайловская военная артиллерийская академия

D.V. Gorelov, V.A. Elisov, D.A. Pervukhin

Объектом исследования в статье являются вопросы моделирования сложных технических систем, таких как перспективные ракеты и реактивные снаряды на этапе их разработки и проведения приемочных испытаний. В статье представлены результаты анализа принципов математического и имитационного моделирования перспективных ракет и реактивных снарядов, а также технологии, применяемые при моделировании высокоточного оружия (ракет и реактивных снарядов). Определены пути развития математического и имитационного моделирования, а также применение современных технологий компьютерного проектирования при разработке и проведении испытаний перспективных ракет и реактивных снарядов.

Ключевые слова: моделирование, адекватность, ракеты, реактивные снаряды, имитационное моделирование, математическое моделирование.

The object of research in the article is the modeling of complex technical systems, such as advanced rockets and rockets at the stage of their development and acceptance tests. The article presents the results of the analysis of the principles of mathematical and simulation modeling of advanced missiles and rockets, as well as technologies used in modeling high-precision weapons (missiles and rockets). The ways of development of mathematical and simulation modeling, as well as the use of modern computer-aided design technologies in the development and testing of advanced rockets and rockets are determined.

Keywords: modeling, adequacy, rockets, rockets, simulation modeling, mathematical modeling.

Моделирование (физическое, математическое, интеллектуальное, социальное) является одной из главнейших составных частей разработки новейших образцов вооружения. Ряд этапов развития и внедрения сложной системы проходит не в реальном ее виде, путем вступления во взаимодействие и сражение с окружающим (обычно вначале неблагоприятным) миром, а в виде модели, сложившейся в уме и взаимодействующей с интеллектуальной средой.

Роль моделирования в техническом прогрессе создания и испытания образцов ракетно-артиллерийского вооружения непрерывно растет.

Модель представляется как сущность, воспроизводящая явление, объект или свойство объекта реального мира [1]. Фактически это упрощенное описание реальной системы, такой как комплекс высокоточного оружия, ее структуры и функций с использованием физических, логи-

ко-математических, информационно-лингвистических и других инструментальных средств.

Разработка перспективных образцов высокоточного оружия (ракет и реактивных снарядов) начинается с моделирования — создания представления о месте, цели и предполагаемом способе применения. Моделирование может осуществляться в уме одного человека, силами группы людей, роли которых расписаны заранее, с помощью персональных электронных вычислительных машин или физических устройств.

Л. Берталанти говорил, что каждая наука является в широком смысле моделью, т.е. понятийной структурой, цель которой — отразить определенные аспекты реальности. Интеллектуальная система всегда проще реальной системы. Однако если ограничить реальную систему на определенном уровне, то интеллектуальная система может быть как сложнее, богаче по содержанию, разностороннее, так и проще.

На рис. 1 приведена схема раскрытия «таинственных» свойств сложно организованной системы через моделирование [3].

Наблюдения за реальной системой посредством стрельбовых экспериментов высокоточных боеприпасов (ракет и реактивных снарядов) в лучшем случае могут дать материал лишь для проверки той или иной гипотезы, той или иной модели, поскольку они представляют собой источник информации ограниченного объема о прошлом этой системы. Модель допускает более широкие исследования, результаты которых дают нам информацию для прогнозирования поведения системы, характера её траектории. Правда при этом приходится решать проблему соответствия принципа адекватности модели и исходной системы — оригинала реальной системы, т.е. проводить дополнительное исследова-

ние для уточнения согласованности результатов моделирования с реальной ситуацией [6–9].

Создавая модель, исследователь «познаёт систему», т.е. выделяет её как объект из окружающей среды и строит её формальное описание в соответствии с поставленными целями, задачами и имеющимися возможностями. В дальнейшем он анализирует систему через поведение модели, её свойства, состояния, возможные изменения, разрешённые и запрещённые формы существования и т.п.

В процессе моделирования исследователь имеет дело с тремя объектами:

- системой (реальной, проектируемой, испытываемой, воображаемой);
- математической моделью системы;
- машинной (алгоритмической) моделью [2].

В процессе построения математической модели исследователь получает более полное и структурированное представление об изучаемой системе и разрабатывает различные варианты модели, отвечающие разным сторонам функционирования системы и их структурных преобразований.

На этой стадии, по сути, начинается процесс анализа модели. Однако основные проблемы исследования систем на машинных моделях сводятся к получению качественной картины поведения модели, а также необходимых количественных характеристик. При этом исследователь вправе использовать не только информацию, содержащуюся в модели, но и полученную на этапе создания модели [7–9].

Из этого можно сделать вывод, что модель никогда не сможет полностью воспроизвести реальный объект. Модель отражает в той или иной степени уровень наших знаний о реальной системе и процессах, протекающих в ней. Меж-

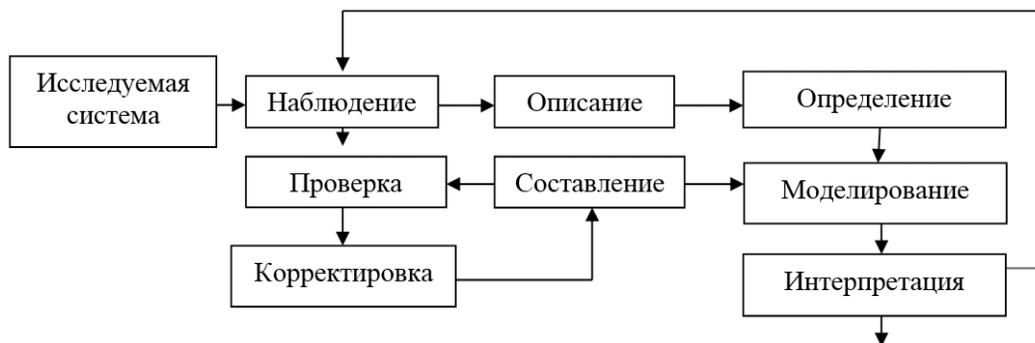


Рис. 1. Схема раскрытия свойств исследуемой сложно организованной системы

ду тем, несмотря на упрощенное представление реальной системы, модель позволяет изучить те особенности и возможности систем, которые не наблюдаются в процессе функционирования реальной системы.

Теория систем формирует представление об основных принципах моделирования систем.

Многие процессы реального мира обладают некоторыми общими закономерностями, которые представляют собой принцип инвариантности. Модель, разрабатываемая для анализа конкретного образца высокоточного оружия (ракет и реактивных снарядов), должна в первую очередь учитывать именно эти закономерности и не зависеть от специфических особенностей конкретного образца высокоточного оружия.

После проведения множества исследований можно сделать вывод, что с помощью одного типа дифференциальных уравнений можно описать процессы функционирования механических, кинетических и динамических систем, поскольку этим системам присуща общая закономерность динамики поведения.

Модель должна допускать как наращивание ее сложности, так и упрощение. Этот процесс можно сформулировать как принцип открытости модели. Для этого модель разрабатывается по модульной схеме, когда модуль представляет собой завершенную функциональную часть системы, а входы и выходы модулей согласованы общим стандартным интерфейсом.

Структура, функции и параметры реальных систем меняются во времени, что приводит к учету одного из основных принципов — принципа неопределенности. Модель представляет некоторый временной интервал работы системы (ракеты и реактивного снаряда), в котором зафиксированы их структура, функции и параметры. Для учета возможных изменений системы (ракет и реактивных снарядов) в модели должна быть предусмотрена некоторая неопределенность, выражающаяся в том, что некоторые параметры системы рассматриваются как случайные. На входы системы действуют случайные возмущения, а выходные результаты содержат случайные отклонения [4].

Модель должна давать результаты, которые не противоречат экспериментальным данным, то есть быть адекватной. Этот принцип, по сути, является следствием философского закона познания: «Практика — критерий истины».

Анализ адекватности может производиться двумя путями:

- во-первых, дедуктивным путём (т.е. выводом частных положений из общих положений — аксиом, общих суждений, правил, законов) выводятся различные следствия исходных предпосылок и сопоставляются с неформализованными представлениями о системе-оригинале;

- во-вторых, если формальная конструкция допускает численную реализацию, проверка адекватности производится посредством эксперимента; в этом случае неадекватность результата эксперимента реальным данным, полученным на системе-оригинале, может быть вызвана погрешностями исходной или контрольной информации (случаи неадекватности модели и системы-оригинала нередко объясняются формально-логической неполнотой языка её описания).

Существуют и другие принципы моделирования, используемые исследователями при разработке различных видов моделей.

Технологический процесс разработки моделей ракет и реактивных снарядов является итерационным и включает в себя ряд этапов, представленных далее.

Определение объекта моделирования. На этом этапе исследователь должен четко определить назначение и объем задач, решаемых системой, ее тип, структуру и функциональные параметры, выделить из среды функционирования систему, определить характер ее взаимодействия со средой, возможности по наблюдению за системой и документированию результатов, сформировать базу данных для моделирования. Данный этап завершается разработкой сценария моделирования (концептуальной модели).

Разработка модели. На данном этапе исследователь должен определить тип и структуру модели, выбрать из арсенала математических и инструментальных средств те, которые представляются наиболее адекватными и эффективными для описания системы. Далее конструируется внутренняя логика модели, устанавливаются функциональные и алгоритмические соотношения между входными и выходными параметрами системы, производится качественный анализ модели, формулируются условия корректности модели. Выбор той или иной модели зависит от сущности изучаемой системы, знаний исследователя о системе и его возможностях по приме-

нению того или иного инструмента исследований. Общая схема моделирования показана на рис. 2 [1].

Трансляция модели. Данный этап заключается в описании математической модели на определенном алгоритмическом языке для реализации на ЭВМ. Для построения математических и имитационных моделей в настоящее время широко применяются такие инструментальные средства, как AutoCAD (Autodesk, Inc., США), Компас-3D (АСКОН, Россия), ПК ЛИРА-САПР («Лира сервис», Россия). Для моделирования механики сплошных сред и прочностных расчетов используются программные комплексы автоматизации инженерного проектирования, такие как ANSYS (ANSYS, США), OpenFOAM (OpenCFD Ltd, Великобритания), ЛОГОС (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Россия). После трансляции модели исследователь получает моделируемый объект.

Испытание модели. На этом этапе осуществляется анализ корректности модели, проверка ее адекватности, оценка точности и надежности получаемых результатов. Под корректностью модели понимается устойчивость выходных параметров модели при малом возмущении входных данных в выбранном диапазоне. Адекватность модели отражает степень близости модели реальной системе. В качестве меры близости рассматривают дисперсионное отношение Фишера.

Пусть имеется выборка экспериментальных данных, полученных в результате наблюдения за системой, и выборка результатов моделирования системы в тех же условиях. Выборки экспериментальных данных и результатов моделирования предполагаются случайными, так как нет основания утверждать, что именно они достоверно отражают процесс функционирования системы и ее модели. Тогда дисперсионным отношением

Фишера будет являться отношение выборочных дисперсий результатов моделирования и экспериментальных данных.

Дисперсионное отношение имеет распределение Фишера с $(N, N-1)$ степенями свободы. Для проверки адекватности модели выдвигается гипотеза о получении результатов моделирования, не противоречащих экспериментальным данным.

Оценка точности и надежности результатов моделирования состоит в построении доверительных оценок для выходных параметров модели с заданной доверительной вероятностью. При условии адекватности модели выборочное среднее результатов моделирования имеет асимптотически нормальное распределение со средним значением выхода системы на испытании модели, при моделировании, ее корректировке и анализе результатов моделирования.

При моделировании и статистическом анализе его результатов задается уровень значимости или величина доверительной вероятности, определяется доверительный интервал. Ширина доверительного интервала характеризует точность результатов моделирования, а доверительная вероятность — их надежность.

Планирование вычислительных экспериментов производится после испытаний модели, оценки ее адекватности и точности. Далее модель готова к практическому использованию. Проведение дальнейшего исследования связано с проведением вычислительных экспериментов на модели. Поскольку каждый такой эксперимент требует затрат времени и вычислительных ресурсов, то на данном этапе возникает задача планирования вычислительных экспериментов. Суть этой задачи состоит в том, чтобы в рамках заданного времени исследования и вычислительных ресурсов осуществить моделирование и интерпретацию его результатов для получе-



Рис. 2. Схема моделирования высокоточного оружия (ракет и реактивных снарядов)

ния максимального объема информации об исследуемом процессе.

Так, например, для поиска глобального экстремума сложной функции нескольких переменных задача вычислительного эксперимента будет состоять в выборе нескольких численных алгоритмов поиска (градиентный метод, метод Ньютона, метод покоординатного спуска и т.д.), определении начальной области поиска экстремума, выборе условий переключения с одного алгоритма на другой для достижения нужной точности поиска, определении условий останова поиска.

Интерпретация и документирование результатов является заключительным этапом моделирования. Полученные результаты должны правильно интерпретироваться в рамках исследуемого процесса. Исследователь должен выявить его новые свойства или особенности, отобразить полученные результаты в виде таблиц, графиков, диаграмм и составить отчет о проведенном исследовании. Все это требует от исследователя высокой профессиональной культуры, интеллектуального напряжения и творчества.

В настоящее время при проведении разработок перспективного высокоточного оружия ракет и реактивных снарядов отсутствует нормативная база, позволяющая регламентировать разработку и применение методов моделирования. Отсутствует единый научно-методический подход к оценке результатов моделирования, а также объединения результатов, полученных путем моделирования, с результатами стрельбовых экспериментов. Выработка единого подхода по обработке и оценке полученных результатов приведет к сокращению количества стрельбовых экспериментов, а также позволит сократить общую стоимость разрабатываемого перспективного высокоточного оружия (ракет и реактивных снарядов).

Литература

1. ГОСТ Р 57412–2017 Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения. — М.: Стандартинформ, 2018. 15 с.
2. Аврамчук Е.Ф., Вавилов А.А. и др. Технология системного моделирования. Под общей редакцией Емельянова С.В. и др. Машиностроение. — Берлин: Техник, 1988. 519 с.
3. Чуев Ю.В., Михайлов Ю.Б., Кузьмин В.И. Прогнозирование качественных характеристик процессов. — М.: Советское радио. 1975. 398 с.
4. Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем / Л.Н. Александровская, В.Н. Круглов, А.Г. Кузнецов и др.: учебн. пособие. — М.: Лотос. 2003. 763 с.
5. Новиков И.В. Методика выбора оптимального взрывчатого вещества артиллерийского высокоточного осколочно-фугасного боеприпаса // Известия ТугГУ. Системный анализ, управление и обработка информации. Технические науки. 2020. Вып. 6. С. 147–152.
6. Руссков В.Ф., Никулин Е.Н. Основы проектирования кассетных артиллерийских боеприпасов. Основы проектирования кассетных артиллерийских боеприпасов: учебное пособие / В.Ф. Руссков, Е.Н. Никулин; Балт. гос. техн. ун-т. — СПб., 2013. 218 с.
7. Русинов В. Состояние и перспективы развития 155-мм боеприпасов полевой артиллерии за рубежом // Зарубежное военное обозрение. 2002. № 3. С. 12–15.
8. Турчак Л.И. Основы численных методов: учебное пособие / Л.И. Турчак, П.В. Плотников. 2-е изд., пер. и доп. — М.: Физматлит, 2002. 304 с.
9. Строев В. Кассетные боеприпасы с самоприцеливающимися боевыми элементами // Зарубежное военное обозрение. 2000. № 8. С. 20–25.