

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента Кэрта Бориса Эвальдовича  
на диссертационную работу Суфиянова Вадима Гарайхановича  
"Решение задачи комплексного моделирования артиллерийского  
выстрела с применением визуальных технологий для проектирования  
и отработки артиллерийских систем», представленную на соискание  
ученой степени доктора технических наук по специальностям  
05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации  
(в науке и технике)» и 05.13.18 – «Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ»

### **Актуальность темы диссертации**

Математическое моделирование функционирования технических систем, в том числе систем вооружений, в настоящий момент является важнейшей составной частью процесса их разработки, включая проектирование и испытания. При этом наибольшую ценность представляют технологии математического моделирования, позволяющие моделировать процесс функционирования технической системы в целом, с учетом взаимозависимости различных стадий процесса функционирования и взаимосвязи физических процессов, определяющих действие системы на каждой стадии. Такие технологии характеризуются большим объемом обрабатываемой и представляемой исследователю или проектировщику информации. Поэтому они должны укомплектовываться развитыми средствами визуализации, сравнительного анализа и автоматизированной оценки результатов и исходных данных, а также рационального выбора и оптимизации параметров системы или условий ее функционирования на ранних стадиях проектирования или испытаний опытного образца. То есть они должны представлять собой интегрированные компьютерные среды, ориентированные на сопровождение процессов проектирования и испытаний конкретных классов технических систем. Эти программные средства должны базироваться на развитых содержательных математических моделях отдельных сторон процесса функционирования и обеспечивать пользователю информационно насыщенный и удобный интерфейс. В этом случае использование такой компьютерной среды при проектировании и производстве испытаний способно в разы увеличить производительность труда. Применительно к системам вооружений нельзя рассчитывать на возможность заимствования таких программных средств на внешнем рынке. Поэтому тематика представленной к защите работы, посвященной разработке системы комплексного математического моделирования артиллерийского

выстрела на стадии проектирования и испытаний, является актуальной и имеющей важное значение для науки и практики.

### **Новизна проведенных исследований и полученных результатов**

Новизна диссертационной работы заключается в разработке программной среды, позволяющей реализовать комплексное математическое моделирование процесса артиллерийского выстрела, реализовать параметрические исследования и оптимизацию конструкции, сформировать рациональные управленческие решения при организации полигонных испытаний и настройке измерительно-регистрирующих узлов в условиях функционирования развитой системы визуализации результатов. В представленной работе реализовано расчетное ядро такой компьютерной среды. Приоритет разработки подтвержден свидетельствами о государственной регистрации пяти программных комплексов.

Реализация указанного результата проведена на базе сочетания известных подходов к решению отдельных задач, так и новых математических моделей и методов их численной реализации.

К числу наиболее существенных результатов диссертации следует отнести:

1. Разработку иерархической структуры системы полигонных испытаний артиллерийских установок и формирование функциональной модели взаимодействия ее элементов.

2. Создание виртуальной системы полигонных испытаний, включающей цифровую пространственную модель поверхности полигона с элементами инфраструктуры, объектами испытаний и измерительной аппаратуры.

3. Разработку, численную и программную реализацию и апробацию сравнением с экспериментом модели внутренней баллистики выстрела, сочетающую квазиодномерное описание нестационарного течения газопороховой смеси с моделированием нестационарного горения зерненого и трубчатого порохов с учетом эрозионного эффекта. Сеточное решение строится на сочетании метода СЭЛ для уравнений движения гетерогенной среды и аппроксимации уравнений теплопроводности для горящего пороха по схеме Кранка-Николсона. Реализация модели имеет существенные элементы новизны. В частности, предложен способ задания шага по времени при интегрировании уравнений нестационарного горения выбором шага, пропорционального времени релаксации прогретого слоя, позволивший купировать элементы вычислительной неустойчивости.

4. Расчетное обоснование системы корректирующих функций, позволяющих уточнить расчеты внутренней баллистики выстрела по термодинамической модели.

5. Результаты сравнительного анализа различных методов получения аппроксимационных соотношений для основных параметров выстрела при статистической обработке результатов численных экспериментов.

6. Отработанную методику расчетного получения зависимостей аэродинамических коэффициентов боеприпасов от чисел Маха, и их использования во внешнебаллистическом расчете.

7. Реализацию расчетных алгоритмов в виде единого, открытого для расширения и взаимодействия с ANSYS-autodin и ANSYS-fluent программного комплекса, снабженного удобным пользовательским интерфейсом.

8. Реализацию методик, позволяющих на основе решения вышеупомянутых задач и 3D представлений подстилающей поверхности и обстановки на полигоне, прогнозировать точки падения боеприпасов на местности, зоны осколочного поражения и безопасные зоны.

#### **Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов, рекомендаций и заключений**

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов, рекомендаций и заключений, полученных в диссертации, подтверждается корректным использованием современных методов механики, методов математического моделирования, методов построения аппроксимирующих зависимостей и вычислительных алгоритмов. Достоверность полученных результатов подтверждается также приведенными результатами сравнения натурных и компьютерных экспериментов, апробацией основных результатов на конференциях и семинарах, в опубликованных работах.

#### **Значимость результатов, полученных в диссертации, для науки и практики**

Научная значимость результатов заключается в развитии целостной концепции компьютерной среды моделирования и полигонных испытаний артиллерийских систем, основанной на системе взаимосвязанных физико-математических моделей баллистического функционирования

Практическая значимость результатов заключается в реализации вышеуказанной концепции в виде единого программного комплекса, обеспечивающего поддержку принятия решений при баллистическом проектировании и полигонных испытаниях артиллерийских систем и автоматизированную настройку элементов измерительной аппаратуры.

Практическая значимость основных положений диссертации подтверждается использованием полученных результатов при создании программно-аппаратного комплекса в ФКП «НИИ Геодезия», а также в учебном процессе ФГБОУ ВО «ИжГТУ им. М.Т.Калашникова».

Основные результаты работы получены в ходе выполнения НИОКР в рамках Федеральных целевых программ.

### **Замечания по диссертационной работе в целом**

1. При постановке внутрибаллистической задачи сформулирована и решена сопряженная задача теплообмена между газовым потоком и прогреваемыми им горящими зернами пороха. В то же время, более простая задача теплообмена со стенками ствола решается в несопряженной постановке на базе приближенного решения Р.Е.Соркина для температуры внутренней поверхности ствола. Это безусловно снижает точность моделирования и не дает возможности учета влияния разогрева ствола на его прочностные свойства.

2. В первой главе работы сформулирована задача имитационного моделирования баллистики снарядов, стабилизированных как оперением, так и вращением. В то же время уравнение движения снаряда в стволе (см. (3.40)) записано без учета взаимодействия ведущего пояска с нарезами и может быть применено только для гладкоствольной пушки.

3. В разделе 3.2 дано общее описание задачи моделирования напряженно-деформируемого состояния ствола при выстреле, решаемой с использованием рыночного программного продукта ANSYS-autodin. Остался неясным порядок включения указанной задачи в общую расчетную схему и возможность учета влияния прогрева ствола на его деформацию при выстреле.

4. Сформулированная модель внешнебаллистического функционирования предполагает расчет вращательного движения правильно движущегося по траектории снаряда решением дифференциальных уравнений для углов Де-Спарра. В то же время из решения внутрибаллистической задачи невозможно получить начальные условия для этих уравнений, и, следовательно, их приходится задавать нулевыми.

5. В целом работе, во всех ее частях, недостает апробации расчетных алгоритмов на решении системы тестовых задач, позволяющей судить о реальной точности используемых разностных методов.

6. Реализованную модель движения осколков следовало бы дополнить оценкой значимости таких факторов, как скорость ветра, угловая скорость снаряда, скорость воздуха за ударной волной.

## Общая характеристика диссертационной работы

В целом, несмотря на отмеченные недостатки и замечания, представленная диссертация выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на актуальную тему, в которой, на основании выполненных автором исследований, изложены новые научно обоснованные научные, технические и технологические решения, связанные с разработкой, теоретическим и экспериментальным обоснованием компьютерной среды комплексного математического моделирования артиллерийского выстрела, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли достаточную апробацию на 4 международных и 7 всероссийских научно-технических конференциях, и опубликованы в 38 научных трудах соискателя, включая 26 статей, в том числе 17 в журналах из перечня ВАК, 7 отчетов по НИР и 5 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Учитывая актуальность исследований, научную новизну и практическую значимость полученных результатов считаю, что представленная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям п. 8 «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор – Суфиянов Вадим Гарайханович заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук специальностям 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации (в науке и технике)» и 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент  
заведующий кафедрой «Средства поражения и боеприпасы»  
ФГБОУ ВО БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова,  
член - корреспондент РАН,  
доктор технических наук, профессор \_\_\_\_\_ Б.Э.Кэрт

Подпись официального оппонента заверяю:

Ученый секретарь  
ФГБОУ ВО БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова



25 апреля 2017 г.

\_\_\_\_\_ М.Н.Охочинский