

ОТЗЫВ

официального оппонента
заведующего кафедрой динамики полета федерального
государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный исследовательский Томский
государственный университет», доктора физико-математических
наук, доцента Биматова Владимира Исмагиловича на диссертацию
Королева Станислава Анатольевича на тему «Развитие подходов к
решению проблем аэродинамики и устойчивости движения
снарядов и неуправляемых ракет на основе математического
моделирования», представленную
на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Актуальность темы диссертации

Методы исследований внешней баллистики опираются на использование большого количества эмпирически полученных зависимостей, формул, коэффициентов. До настоящего времени в баллистических расчетах используют законы сопротивления воздуха (закон 1943 г. и 1958 г.). Для учета различных факторов (нутация, деривация, ветер и др.), влияющих на траекторию снаряда, в баллистической модели применяются поправочные функции и коэффициенты, определяемые на основе эксперимента. Несмотря на сложившиеся традиции во внешней баллистике развитие новых подходов и методов решения внешнебаллистических задач, основанных на современных технологиях математического моделирования, вычислительного эксперимента и компьютерной визуализации, остается актуальной научной проблемой.

Диссертационная работа Королева С.А. посвящена разработке нового подхода к решению задач внешней баллистики, основанного на математическом моделировании процессов аэродинамики и устойчивости движения снарядов и неуправляемых ракет и визуализации результатов моделирования на виртуальной карте местности, позволяющего проводить внешнебаллистические исследования на этапе проектирования боеприпаса.

В отличие от существующих методик, использующих законы сопротивления снарядов эталонной формы и коэффициенты формы реальных снарядов, определяемых на основе полигонных стрельб, в данном подходе определяется полный набор коэффициентов аэродинамических сил и моментов снарядов и ракет различной формы на основе вычислительного



эксперимента, что позволяет проводить оптимизацию баллистических и геометрических параметров и анализ устойчивости их движения на этапе проектирования.

Таким образом, тема диссертационной работы Королева С.А. «Развитие подходов к решению проблем аэродинамики и устойчивости движения снарядов и неуправляемых ракет на основе математического моделирования» является важной и актуальной.

Структура и содержание диссертационной работы

Диссертационная работа изложена на 282 страницах и состоит из введения, 5 глав, заключения, списка основных сокращений и обозначений, списка литературы из 194 источников и приложения объемом 4 страницы.

Первая глава посвящена разработке математической модели внешней баллистики снаряда и расчету аэродинамических коэффициентов на основе численного моделирования его обтекания. Траектория движения снаряда определяется из решения обобщенных уравнений Кирхгофа пространственного движения вращающегося тела. Распределение масс в объеме снаряда задается матрицей моментов инерции, что позволяет учесть влияние асимметрии массы на устойчивость движение снаряда. Аэродинамические силы и моменты определяется на основе численного решения уравнений Навье – Стокса, осредненных по Фавру, и k - ϵ модели турбулентности. Представлена методика учета влияния истечения пороховых газов из канала ствола на движение снаряда на этапе промежуточной баллистики.

Во *второй главе* представлены методы и алгоритмы решения основных задач внешней баллистики на основе разработанного подхода к моделированию аэродинамики и движения снаряда по траектории. Для решения задачи повышения дальности стрельбы применены эффективные методы многомерной оптимизации (метод Хука–Дживса). Разработаны алгоритмы решения обратной задачи внешней баллистики на основе многослойных нейронных сетей и нечетких деревьев решений, обеспечивающие высокую оперативность расчетов. С помощью метода статистического имитационного моделирования решена задача определения границы области рассеивания и зоны безопасности при стрельбе с учетом рельефа местности.

Третья глава посвящена вопросам внешней баллистики при стрельбе из ракетно-артиллерийского вооружения с подвижного носителя (вертолета). Разработана комплексная математическая модель, позволяющая учесть основные факторы, влияющие на точность и кучность стрельбы: движение вертолета, вибрации и импульсы при отстреле вооружения, воздушный поток

от несущего винта и струя реактивного двигателя при последовательных пусках ракет.

В *четвертой главе* приводится описание разработанного программного комплекса, реализующего методы и алгоритмы решения основных задач внешней баллистики, дополненного системой визуализации результатов моделирования.

В *пятой главе* представлены результаты решения задач внешней баллистики при проектировании и отработке ракетно-артиллерийских систем.

Рассматривались различные типы снарядов: осколочно-фугасные и бронебойно-подкалиберные, а также неуправляемая авиационная ракета. На основе численного моделирования внешнего обтекания построены аппроксимационные зависимости для коэффициентов аэродинамических сил и моментов. Представлены результаты сравнения расчетных траекторий с данными натурного эксперимента. Проведено исследование влияния асимметрии массы снаряда на устойчивость его движения по траектории и точность поражения цели. Полученные результаты расчета наглядно убеждают в том, что разработанная методика учитывает аэродинамику метаемого тела заданной формы, позволяет проводить анализ устойчивости движения и дает более точные результаты для широкого диапазона параметров стрельбы.

Представлены результаты решения основных задач внешней баллистики на основе разработанных математических моделей и вычислительных алгоритмов: повышение дальности стрельбы за счет оптимизации аэродинамической формы снаряда, баллистических условий стрельбы, применения реактивной тяги в конструкции снаряда; решение обратной задачи внешней баллистики; определение характеристик рассеивания и размеров зоны безопасности при стрельбе.

Проведено комплексное исследование влияния различных факторов на точность и кучность стрельбы снарядами и неуправляемыми ракетами с подвижного носителя (вертолет Ми-8).

В *приложении* представлены акты внедрения результатов диссертационной работы в ФКП «НИИ «Геодезия» и в ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова».

Содержание диссертации в полной мере отражает суть работы и решение поставленных задач исследования. Текст диссертации хорошо структурирован, обладает логической целостностью и последовательностью изложения материала. Автореферат диссертации в полной мере отражает ее содержание и полученные результаты.

Научная новизна исследования и полученных результатов

Следует выделить как новые и существенные следующие научные результаты, полученные в диссертационной работе:

1. Разработан новый подход к моделированию движения снаряда по траектории на основе полной системы уравнений движения твердого тела с использованием аэродинамических сил и моментов, определяемых из решения уравнений Навье – Стокса, позволяющий совместно исследовать вопросы аэродинамики и устойчивости движения снаряда и существенно расширить круг решаемых задач при проектировании боеприпаса ракетно-артиллерийских систем.
2. На основе разработанного подхода к решению задач аэродинамики и движения снаряда по траектории разработаны и реализованы эффективные численные методы и алгоритмы решения основных задач внешней баллистики:
 - выбора оптимальных баллистических и геометрических параметров снаряда, обеспечивающих повышение дальности стрельбы;
 - обратной задачи внешней баллистики при поражении подвижных целей на основе нечетких деревьев решений;
 - определения границ области рассеивания и зоны безопасности при стрельбе с учетом рельефа местности на основе статистического имитационного моделирования.
3. Впервые разработана комплексная математическая модель механической и аэродинамической системы «вертолет – вооружение», учитывающая взаимное влияние подвижного носителя и ракетно-артиллерийского вооружения на точность и кучность стрельбы.
4. Разработан программно-вычислительный комплекс решения задач внешней баллистики и визуализации результатов вычислительного эксперимента на виртуальной карте местности, позволяющий проводить внешнебаллистические исследования на этапе проектирования боеприпаса.

Степень обоснованности и достоверности научных положений

Полученные в диссертационной работе Королева С.А. теоретические выводы и практические результаты обосновываются использованием апробированных научных положений, методов исследования и вычислительных технологий: математического моделирования, вычислительной аэродинамики, численного решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений, многомерной оптимизации, статистического имитационного моделирования, нейронных сетей и деревьев решений.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается апробацией результатов работы на научных конференциях и форумах, опытом практического применения разработанного программного комплекса, а также сравнением с результатами экспериментальных исследований.

По проблеме диссертационного исследования автором опубликована 41 работа, в том числе 22 статьи в журналах из Перечня ВАК РФ, из них 7 статей, индексируемых в международных базах данных WebofScience и Scopus, зарегистрированы 3 программы в едином реестре российских программ для ЭВМ и баз данных.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследования

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в разработке нового подхода к решению задач внешней баллистики, основанного на совместном решении уравнений движения снарядов и ракет и аэродинамики их обтекания, позволяющего проводить оптимизацию баллистических и геометрических параметров и анализ устойчивости их движения на этапе проектирования.

Практическая значимость результатов диссертационной работы заключается в разработке математического и программного обеспечения, позволяющего сократить объем натурных испытаний при отработке боеприпаса ракетно-артиллерийских систем.

Замечания по диссертационной работе

1. В правой части системы уравнений движения метаемого тела (1.5) присутствуют вектора реактивной силы и момента. Далее в п.1.1.3 выражений для расчета компонентов этих векторов не приводится. Однако в инженерной методике, представленной в п.1.1.4, выражение для реактивной силы приводится в скалярной форме. В описании методики расчета траектории следовало бы уточнить, как задаются реактивная сила и момент в векторной форме.
2. При решении задачи аэродинамики обтекания тела потоком воздуха в качестве граничных условий для теплообмена выбрано условие теплоизоляции (стр. 58). Однако известно, что при движении тел со сверхзвуковыми скоростями температура тела может повышаться на сотни градусов. Насколько обосновано допущение об отсутствии теплообмена в модели аэродинамики обтекания тела?
3. Тестирование методики численного моделирования обтекания тела производилось на простых телах: сфера и цилиндр с конической головной частью. При этом сравниваются результаты по двум методикам: решение осредненных по Фавру уравнений Навье-Стокса

(FANS) и прямое численное моделирование (DNS), а также с результатами эксперимента по коэффициенту лобового сопротивления. Для более обоснованного тестирования необходимо было провести сравнение с экспериментом также по локальным характеристикам течения (распределение давления на сфере). К тому же локальные результаты расчета, полученные по двум методикам, отличаются (рис. 1.16).

4. При решении задачи промежуточной баллистики в качестве начальных условий в стволе орудия задаются распределения параметров газа, полученные из решения задачи внутренней баллистики, а во внешней области – параметры окружающей среды (стр.76). Однако известно, что при движении снаряда по стволу орудия перед снарядом образуется отошедшая ударная волна. Следовало бы задать начальное распределение параметров также перед снарядом в момент выхода из ствола.
5. В п.5.4.1 представлены результаты решения задачи оптимизации аэродинамической формы снаряда. На рис. 5.35 приведены оптимальные значения коэффициента лобового сопротивления для числа Маха $M=2,0$ (стр.217). При этом неизвестно, будут ли найденные параметры оптимальными на всем диапазоне изменения чисел Маха при движении снаряда по траектории.

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы в целом. Считаю, что диссертационная работа Королева С.А. «Развитие подходов к решению проблем аэродинамики и устойчивости движения снарядов и неуправляемых ракет на основе математического моделирования» является завершенным научно-исследовательским трудом, выполненным автором самостоятельно на высоком научном уровне.

Диссертация обладает внутренним единством и содержит новые научные результаты и положения. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Основные научные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях и прошли апробацию на научных конференциях.

Текст автореферата отражает основное содержание диссертации. Содержание автореферата и диссертации соответствует заявленной специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Таким образом, диссертация Королева Станислава Анатольевича является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена актуальная научная проблема,

связанная с разработкой математического и программного обеспечения решения задач внешнебаллистического проектирования, имеющая важное хозяйственное значение, что соответствует п. 9 действующего Положения о присуждении ученых степеней, а соискатель заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент,
заведующий кафедрой динамики полета
Национального исследовательского
Томского государственного университета,
доктор физико-математических наук
(специальность 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы),
Доцент



Биматов Владимир Исмагилович

«13» 05 2020 г.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский Томский
государственный университет»
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36,
тел.: 529-852; e-mail: rector@tsu.ru, www.tsu.ru
тел. +7 (3822) 529-845; e-mail: vbimatov@mail.ru



СВЕДЕНИЯ ОБ ОФИЦИАЛЬНОМ ОППОНЕНТЕ

по диссертационной работе **Королева Станислава Анатольевича**
на тему «**Развитие подходов к решению проблем аэродинамики и устойчивости движения снарядов и неуправляемых ракет на основе математического моделирования**», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Фамилия Имя Отчество	Биматов Владимир Исмагилович
Шифр и наименование специальностей, по которым защищена диссертация	01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.
Ученая степень и отрасль науки	Доктор физико-математических наук (физико-математические науки)
Ученое звание	Доцент
Полное наименование организации, являющейся основным местом работы оппонента	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»
Занимаемая должность	Заведующий кафедрой «Динамика полета»
Почтовый индекс, адрес	634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36
Телефон	тел. +7 (3822) 529-845
Адрес электронной почты	vbimатов@mail.ru
Список основных публикаций официального оппонента по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15 публикаций)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Биматов В.И., Савкина Н.В., Фарапонов В.В. Сверхзвуковое обтекание и аэродинамические характеристики острого конуса для различных моделей турбулентной вязкости // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2016. № 5 (43). С. 35-42. 2. Биматов В.И., Бородачева И.А., Лавронович А.Н. Исследование направленного выброса компонующего тела разделяющейся составной системы под действием аэродинамических сил // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2018. № 54. С. 58-65. 3. Биматов В.И., Бородачева И.А., Лавронович А.Н., Савкина Н.В. Гистерезис аэродинамических характеристик и его влияние на параметры движения осесимметричных тел // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2018. № 52. С. 35-40. 4. Математическое моделирование движения неуправляемого осесимметричного тела в однородном поле силы тяжести: учебное пособие / В.В. Фарапонов, Н.В. Савкина, В.И. Биматов.

	<p>Томск: STT, 2017. 60 с.</p> <p>5. Практикум по аэробаллистике: учебное пособие / В.В. Фараонов, В.И. Биматов, Н.В. Савкина, Ю.Ф. Христенко. Томск: STT, 2017. 84 с.</p> <p>6. Основы экспериментальной внешней баллистики: учебное пособие / В.И. Биматов, Н.В. Савкина, С.В. Тимченко, В.В. Фараонов. Томск: STT, 2017. 122 с.</p> <p>7. Герасимов А.В., Биматов В.И., Жаровцев В.В., Пашков С.В., Христенко Ю.Ф. Комплексное экспериментально-теоретическое исследование стойкости стекла при ударном взаимодействии с высокоскоростными космическими осколками // В сборнике: XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2015. С. 921-923.</p>
--	---

Заведующий кафедрой

«Динамика полета»

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский

Томский государственный университет»

д.ф.-м.н., доцент



В.И. Биматов

Сведения о В. И. Биматове подтверждаю.

Ученый секретарь

Ученого совета НИ ТГУ



Н.А. Сазонтова

«20» 03 2020 г.