**4.5. Современное состояние исследований по данной проблеме, основные направления исследований в мировой науке и научные конкуренты**

|  |
| --- |
| Внутренняя баллистика в стволе орудия  Современный отечественный уровень исследований в области внутренней баллистики артиллерийских установок определяется научными школами Национального исследовательского Томского государственного университета (А.Н. Ищенко, В.З. Касимов и др. [3-4]) и Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова (А.М. Липанов, И.Г. Русяк и др. [5-6]).  При моделировании внутрикамерных процессов широко применяются многопроцессорные вычислительные системы. В Институте автоматизации проектирования РАН совместно с Институтом прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН коллективом авторов (И.В. Семенов, П.С. Уткин и др.) разработан программный комплекс “Барс-1МП”, предназначенный для моделирования внутрибаллистического процесса в одномерной постановке [7-8].  Результаты математического моделирования влияния динамики процессов внутренней баллистики на напряженно-деформированное состояние ствола представлено в статье В.Г. Суфиянова (ИжГТУ имени М.Т. Калашникова) [9]. В работе В.Л. Баранова (Тульский государственный университет) и Н.П. Смирнова (ФКП НТИИМ) [10] представлена модель волнового нагружения и разрушения стволов артиллерийского орудия в процессе выстрела. Пространственные модели взаимодействия системы «орудие - ствол – выстрел» разрабатываются коллективом авторов ЦНИИ “Буревестник”. В работе [11] излагается методика определения углов вылета снаряда из нарезных и гладкоствольных орудий на основе численного пространственного моделирования в пакете LS-DYNA, при этом внутрибаллистические расчеты выполняются в нульмерной постановке.  Активно проводятся работы по разработке программного обеспечения в зарубежных странах, входящих в блок НАТО. Среди зарубежных программных комплексов для решения задачи внутренней баллистики широко применяются: программный комплекс MOBIDIC NG [12] (ISL/ETBS, Франция), программные комплексы CTA1 [13], FHIBS [14] (QinetiQ, Великобритания), программный комплекс AMI1D NG (AMImultiD, Германия) [15]. Позволяет решать задачу внутренней баллистики в одномерной постановке, программный комплекс XKTC (Aberdeen Proving Ground, США) [16], программный комплекс Casbar (Defence Science and Technology Organisation, Австралия) [17]. программный комплекс FINFLO (Helsinki University of Technology Laboratory of Aerodynamics, Финляндия) [18, 19].  Исследования в области моделирования внутрибаллистических процессов проводятся в Швеции (FOAM) [20], Сербии (TWOPIB) [21], Южной Африке (FLO++) [22] и в других странах.  В настоящем проекте к разработке предлагается программно-вычислительный комплекс, в котором планируется совместить технологию визуального ЗD-моделирования и технологию вычислительного эксперимента. Предлагаемый программно-вычислительный комплекс ориентирован на решение задач внутренней, внешней, конечной баллистики и управления движением снаряда на траектории при проектирования артиллерийских систем и получение новых знаний о процессах, протекающих при выстреле, за счет решения взаимосвязанных баллистических задач.  Внутренняя баллистика РДТТ  ВНУТРЕННЯЯ БАЛЛИСТИКА РДТТ  Принцип действия ракетного двигателя основан на том, что тяга двигателя создаётся за счёт реакции газов, выбрасываемых из двигателя под действием внутренних сил. К массе, состоящей из массы ракетного двигателя и массы выбрасываемых из него газов, применима теорема из теоретической механики о движении центра масс системы, согласно которой «центр масс системы движется как материальная точка, масса которой равна массе всей системы и к которой приложены внешние силы, действующие на систему». Из этой теоремы вытекает закон сохранения движения центра масс, который не изменяет своего положения при отсутствии внешних сил [1].  Чтобы изменить движение тела, нужна внешняя сила (тяговое усилие). Для создания тяги (кроме двигателя) нужен движитель (колесо, гребной винт). Движитель отбрасывает внешнюю среду. Движение тела под действием силы реакции при отбрасывании массы от этого тела в окружающее пространство, называется реактив-  ным движением. Сила реакции, создаваемая реактивным двигателем, направлена в сторону, противоположную направлению скорости потока отбрасываемой массы. Ракетные двигатели – это реактивные двигатели прямой реакции, предназначенные для летательных аппаратов, на борту которых размещены запасы энергии и рабочее тело. Основная их особенность – для создания реактивной силы они не используют окружающую среду и источники энергии, находящиеся вне летательного аппарата. Однако окружающая среда оказывает влияние на выходную количественную характеристику ракетного двигателя – тягу. Назначение камеры ракетного двигателя – преобразование энергии топлива в кинетическую энергию струи для создания реактивной силы. Необходимое для получения струи ускорение выбрасываемого вещества можно получать посредством различных воздействий на поток: геометрического, расходного, теплового, механического. В ракетном двигателе используют геометрическое воздействие – струя истекающих газов формируется в сопловой, сначала сужающейся, а затем расширяющейся части камеры (сопло Лаваля). Скорость текущих вдоль сопла газов постепенно нарастает, а давление соответственно падает.  Под основной задачей внутренней баллистики РДТТ понимают расчет изменения давления в камере сгорания в функции времени при различных параметрах заряжания. В свою очередь, зависимость определяет изменение во времени тяговых параметров двигателя и ускорения ракеты. Частной задачей внутренней баллистики является определение величины максимального давления в двигателе, необходимой для расчета его на прочность. В становлении и развитии внутренней баллистики РДТТ можно выделить следующие этапы: разработка эмпирических методов определения максимального давления в РД; попытки решения основной задачи внутренней баллистики РДТТ на основе закона горения артиллерийских порохов; частичное решение ОЗВБ РДТТ для квазистационарных режимов его работы; полное решение ОЗВБ РДТТ с включением нестационарных режимов его работы.  Исследование этой является научным интересом во многих странах:  Сербия - Internal Ballistic Modelling of Solid Rocket Motors Using Level Set Methods for Simulating Grain Burnback, Mvuisi Humphrey «Serbja Strong» Tshokotsha, Stellenbosch University  Италия – Modeling and Numerical Simulation of Solid Rocket Motors Internal Ballistics, Ing Enrico “DoP” Cavallini, degree of doctor of Philosophy, Sapienza Universita di Roma,  Россия – Мансуров «Янг тишка» ₽усDM quake 3 arena (HARD MODE)  В настоящее время существуют программы для расчёта характеристик таких двигателей. Наиболее популярная — «SRM» авторства Ричарда Накки (США), существует и русскоязычная версия — Rocki-motor – русский аналог программы SRM  Королев – комочков.  ЛИПАНОВ  Внутренняя баллистика РДТТ / А. В. Алиев, Г. Н. Амарантов, В. Ф. Ахмадеев [и др.]. – Москва : Научно-техническое издательство "Машиностроение", 2007. – 504 с.  Совершенствование метода прогнозирования внутрибаллистических параметров РДТТ / Ю. М. Милехин, С. А. Гусев, В. Н. Эйхенвальд, Н. П. Гордиенко // Внутрикамерные процессы и горение в установках на твердом топливе и ствольных системах (icoc'2014), Москва, 24–26 сентября 2014 года. – Москва: Институт механики Уральского отделения РАН, 2014. – С. 237-239.  Кирюшкин, А. Е. Численный алгоритм решения задачи внутренней баллистики РДТТ с учетом подвижной поверхности горящего топлива / А. Е. Кирюшкин, Л. Л. Миньков // Внутрикамерные процессы и горение в установках на твердом топливе и ствольных системах (ICOC'2017): Сборник трудов Девятой Всероссийской конференции, Москва, 10–12 октября 2017 года. – Москва: Институт механики Уральского отделения РАН, 2017. – С. 92-106.  Твердые топлива реактивных двигателей / В. Н. Аликин, А. В. Вахрушев, В. Б. Голубчиков [и др.]. Том IV. – Москва: Научно-техническое издательство "Машиностроение", 2011. – 377 с.  Внешняя баллистика  *До настоящего времени во внешнебаллистических расчетах используются законы сопротивления, полученные на основе обработки результатов экспериментов. Это эталонные зависимости коэффициента лобового сопротивления, известные как «закон 1930 г.» (формула Сиаччи), «закон 1943 г.» (для вращающихся снарядов) и «закон 1958 г.» (для оперенных снарядов). Для определения индивидуальных коэффициентов сопротивления используются поправочные коэффициенты формы, определяемые из дополнительных экспериментов [31].* *Применение методов вычислительной аэрогидродинамики в программных пакетах инженерного моделирования ЛОГОС, OpenFOAM, FlowVision, ANSYS и др. позволяет непосредственно рассчитывать аэродинамические коэффициенты метаемых тел [32-34].*  *Математические модели внешней баллистики различаются количеством основных переменных, описывающих движение снаряда, и количеством факторов, учитываемых в расчете. В наиболее простых моделях снаряд представлен в виде материальной точки, его движение описывается тремя координатами [35-36]. Эффекты, связанные с аэродинамическим сопротивлением и деривацией вращающихся снарядов, учитываются с помощью эмпирических зависимостей и поправочных функций. Более общие модели внешней баллистики наряду с уравнениями поступательного движения рассматривают также колебания снаряда относительно центра масс [37]. В этих моделях рассматриваются осесимметричные снаряды, что не позволяет исследовать влияние асимметрии формы и неоднородности распределения массы на устойчивость движения. Эти эффекты позволяют учитывать модели внешней баллистики, основаные на полной системе уравнений движения твердого тела, описывающие движение снаряда с шестью степенями свободы (6DoF): тремя координатами центра масс и тремя углами его ориентации в пространстве [38-39].*  *Решение пространственной задачи аэродинамического обтекания требует применения достаточно точных, но в то же время экономичных, методов ее решения. В настоящее время существуют три основных подхода к численному моделированию турбулентных течений [40]. Традиционный подход, основанный на решении уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу (Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS) для несжимаемой среды и осредненных по Фавру (Favre-Averaged Navier-Stokes, FANS) для сжимаемой среды, наименее трудоемкий и не требует огромных вычислительных затрат [41, 42]. Вместе с тем, результаты расчетов по методу RANS (FANS) очень чувствительны к выбору той или иной замыкающей полуэмпирической модели турбулентности. Второй подход, основанный на решении неосредненных уравнений Навье-Стокса, – метод прямого численного моделирования (Direct Numerical Simulation, DNS) [43, 44]. Этот подход наиболее точен и универсален, но требует значительных вычислитьных затрат, поэтому полноценное использование прямого численного моделирования при решении нестационарных задач внешней баллистики в настоящее время не представляется возможным. Третий подход заключается в использовании гибридных методов, опирающихся на алгоритмы RANS (FANS) и LES (Large eddy simulation) [45], известный в литературе как метод моделирования отсоединенных вихрей DES (Detached-Eddy Simulation), занимает промежуточное положение по точности и трудоемкости между первым и вторым подходами [40, 46]. Для проведения массовых расчетов аэродинамического обтекания снаряда на траектории в широком диапазоне изменения параметров эффективно применение наиболее экономичного подхода, основанного на RANS (FANS). При проведении тестовых расчетов с целью настройки параметров моделей турбулентности применяются более точные подходы, основанные на DNS, LES и DES.*  *Оптимизация аэродинамической формы снарядов проводится на основе экспериментальных и теоретических исследований. При этом рассматривается влияние отдельных параметров конструкции снаряда на дальность стрельбы [47, 48]. Решение пространственной задачи аэродинамики снарядов позволит провести комплексную оптимизацию баллистических условий стрельбы и аэродинамической формы снарядов с целью повышения дальности и точности выстрела.*  *Активно-реактивный принцип метания*  *Одним из способов повышения дальности стрельбы является использование активно-реактивного принципа метания. Активно-реактивный снаряд имеет в своей конструкции реактивный двигатель, срабатываемый на траектории его движения. Дальность стрельбы для такого снаряда существенно зависит от параметров работы реактивного двигателя [49, 50], в том числе от времени срабатывания двигателя на траектории [51].*  *Отечественные образцы снарядов для дальнобойной артиллерии калибра 152 мм с донным газогенератором имеют дальность до 30 км, с реактивным двигателем – до 40 км. Наибольшую дальность из зарубежных образцов активно-реактивных снарядов калибра 155 мм имеет снаряд M2005 V-LAP (Rheinmetall Denel Munition, Германия - ЮАР), дольность которого достигает 54 км [52]. Снаряд V-LAP использует комбинацию донного газогенератора, включающегося после покидания ствола орудия, примерно, через 2 с, с реактивным ускорителем, включающимся затем после выгорания донного газогенератора.*  *Предполагается, что оптимизация баллистических характеристик, связанных с активным и пассивным участками траектории полета активно-реактивного снаряда (таких как масса ракетного топлива, время включения, импульс и интервал работы двигатели на траектории полета), позволит достигнуть дальности стрельбы на уровне лучших зарубежных образцов боеприпасов.*  *В исследовании В.Е. Смирнова (АО «НИМИ» г. Москва) и Л.А. Розанова (МГТУ им. Н.Э. Баумана) рассматривалась идея дальнобойного управляемого артиллерийская снаряда[1], где дальность 152мм снаряда увеличилась до 80 км за счёт реактивного двигателя, газогенератора и аэродинамических рулей*  *Исследования активно-реактивного принципа метания[2] проводятся в БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, (Кэрт, Знаменский), в Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, в частности академиком Липановым. Актуальные проблемы, связанные с активно-реактивными снарядами, обозреваются в журнале «ИЗВЕСТИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ РАКЕТНЫХ И АРТИЛЛЕРИЙСКИХ НАУК»[3]. Новосибирский государственный технический университет так же проводит ислледования в этой области. [4]*  ЮАР – Computing the Trajectory of an artillery shell using six degrees of freedom model  *Швеция – Development and evalition of a six degrees of freedom model of a 155 mm artillery projectile, Marcus Thuresson, Royal Institute of Technology, P – 56, 2015*  *Импульсная коррекция траектории*  КОРРЕКЦИЯ  *При повышении дальности стрельбы увеличивается зона рассеивания снарядов. С целью уменьшения рассеивания применяются системы коррекции траектории, основанные на различных принципах. Боеприпасы с импульсной коррекцией («Смельчак» и «Сантиметр») работают на основе RCIC[5] (Российская концепция импульсной коррекции) - технология предусматривает коррекцию на конечном (20–600 метров) участке баллистической траектории. Для этого в центральной части боеприпаса, в районе центра приложения аэродинамических сил (центра давления), перпендикулярно оси снаряда расположены сопла пороховых реактивных двигателей – два у «Смельчака» [6] и четыре у «Сантиметра» [7]. Двигатели импульсные – при включении полностью выгорает один пороховой двигатель, которых у «Смельчака» по три на сопло, а у «Сантиметра» – два на сопло. Ввиду того, что снаряды вращаются в полете, несколькими импульсами и достигается коррекция траектории.*  *«Краснополь» [8] начинает плавную коррекцию траектории за 2,5 км и имеет больший маневр по выборки отклонения от цели, чем «Сантиметр», начинающий коррекцию с 600 метров. Иначе говоря, артсистема с «Сантиметром» вынуждена стрелять точнее. Если еще проще, то стрельба «Краснополем» ведется без пристрелки, а для вероятности поражения «Сантиметром» 0,9 настоятельно рекомендуется выпустить по району целей 1–2 пристрелочных снаряда.*  *Важно отметить, что RCIC-технология создает основу для создания высокоточной артиллерии второго поколения, в которой предусматривается реализовать принцип "выстрелил-забыл". Разработки в этой области ведут ряд стран, однако достоверной информации о принятии на вооружение зарубежных армий комплексов второго поколения нет. По-видимому, не удается в рамках американской концепция аэродинамического управления ACAG создать в приемлемых габаритах автономную головку самонаведения, реализующую дальность захвата более 300-500 м.*  *В то же время в артиллерийском корректируемом снаряде на базе RCIC-технологии, обладающем малым техническим рассеиванием на баллистическом участке полета, оснащенном высокоэнергетической ракетной импульсной системой коррекции траектории, такое решение может быть реализовано.*  *Первым российским боеприпасом с импульсной коррекцией была 240-мм мина ЗФ5 «Смельчак», разработанная под руководством В.С. Вишневского. Мина «Смельчак» (рис. 1) представляет собой боеприпас длиной 1,635 м и массой 134 кг.*  *Исследованием применения «Российской концепции импульсной коррекции» для повышения точности ракетного и артиллерийского оружия занимаются в МГТУ им. Н.Э. Баумана (В.Н. Зубов)[9].*  *Американская концепция аэродинамического управления (ACAG-технология) предусматривает управление снарядом на всей траектории (программное планирование, а затем полуактивное самонаведение при лазерном подсвете в течение 15 сек.), представлена 155-мм управляемым артиллерийским снарядом (УАС) «Копперхед» и др.*  *По технологическим, эксплуатационным и тактическим свойствам, а также по критерию «эффективность–стоимость» массированное применение КАС предпочтительнее УАС, т.е. RCIC-технология имеет преимущества перед ACAG-технологией.*  *Из информированных источников стало известно, что при стрельбовых испытаниях после истечения 10-летнего гарантийного срока хранения надежность УАС – на уровне 50%.*  *При реализации АСАG-технологии требования по максимальной дальности стрельбы (20-22 км) могут быть выполнены только при использовании режима планирования. Если в УАС типа «Копперхед» отсутствует, например, бортовое электропитание (отказ бортового источника тока, обрыв кабеля и т.п.), то недолет составит 10–12 км, а отказ других компонентов – гироскопа, приводов и др. – может приводить к значительным отклонениям также и по направлению.*  Литература   1. Тарг, С.М. Краткий курс теоретической механики / С.М. Тарг. 3-е изд., перераб. – М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1964. – 480 с. 2. Розанов, Л. А. Концепция 152-мм дальнобойного управляемого артиллерийского снаряда (ДУАС) / Л. А. Розанов, В. Е. Смирнов // Комплексные проблемы развития науки, образования и экономики региона. – 2015. – № 1(6). – С. 83-95. 3. Оценка баллистических возможностей артиллерийских снарядов с ракетно-прямоточными двигателями / Б. Э. Кэрт, В. А. Чубасов, Е. А. Знаменский [и др.] // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2019. – Т. 20, № 2. – С. 11. 4. Розанов, Л. А. Сравнительный анализ методик расчета характеристик рассеивания активно-реактивного снаряда / Л. А. Розанов, А. В. Фомичев, В. Е. Смирнов // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – 2018. – № 3(103). – С. 103-109. 5. Способы увеличения дальности боевого применения снарядов / Е. Я. Брагунцов, И. И. Жаровцев, В. И. Звегинцев, А. А. Нестерова // Наука Промышленность Оборона: Труды XXII Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 60-летию со дня первого полёта человека в космос. В 4-х томах, Новосибирск, 21–23 апреля 2021 года / Под редакцией С.Д. Саленко. Том 2. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2021. – С. 176-182. 6. Зубов, В. Н. Системы высокоточного оружия / В. Н. Зубов, Д. В. Лугин. – Москва: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2007. – 56 с. 7. 240-мм корректируемая артиллерийская мина комплекса «Смельчак» // Энциклопедия XXI век. Оружие и технологии России. Часть 2. Ракетно-артиллерийское вооружение сухопутных войск. Группа 12. Средства управления войсками. Класс 1230. Системы (комплексы) управления оружием (огнём). — М.: Издательский дом «Оружие и технологии», 2006. — Т. Том 12. — С. 178—179, 182—183. — 848 с. 8. Зубов В. Отечественные корректируемые мины и снаряды (рус.) // Оружие: журнал. — 2016. — № 04. — С. 52-63. 9. Тихонов С. Г. Оборонные предприятия СССР и России: в 2 т. — М.: ТОМ, 2010. — Т. 1. — 608 с. 10. Зубов, В. Н. Применение "российской концепции импульсной коррекции" для повышения точности ракетного и артиллерийского оружия / В. Н. Зубов // Инновационная наука. – 2016. – № 4-3. – С. 107-110. |