

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт математики, физики и информационных технологий

Кафедра «Прикладная математика и информатика»

01.04.02 ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА И ИНФОРМАТИКА

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Моделирование энергетических газодинамических процессов для
решения задач внутренней баллистики

Студент Г.В. Гринько

Научный руководитель А.И. Сафронов

Руководитель
магистерской программы д.ф.-м.н., доцент, С.В. Талалов

« » 20 г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой к.тех.н., доцент, А.В. Очеповский

« » 20 г.

Тольятти, 2018 г.

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1 Теоретические основы классической и альтернативных схем метания ..	7
1.1 Актуальные вопросы систем выстрела	7
1.2 Описание классической схемы метания.....	8
1.3 Нетрадиционные схемы метания	11
1.4 Обзор патентов.....	13
1.5 Газодинамический метод в схемах метания	15
1.6 Предпосылки к эстафетной схеме.....	19
Глава 2 Математическая модель эстафетной схемы.....	22
2.1 Описание эстафетной схемы.....	22
2.2 Двухскоростная среда	23
2.3 Математическая модель	28
2.4 Разностная схема.....	37
2.5 Расчёт шага	40
Глава 3 Математическая модель схемы с выдвигающимся зарядом.....	43
3.1 Модификация эстафетной схемы.....	43
3.2 Описание схемы с выдвигающимся зарядом.....	44
3.3 Двухскоростная среда	46
3.4 Математическая модель	46
Глава 4 Программная реализация модели	52
4.1 Анализ технических средств реализации.....	52
4.2 Распараллеливание с помощью OpenCL.....	58
4.3 Работа реализованного программного решения.	63
Глава 5 Анализ способов улучшения работы системы.....	66
5.1 Анализ проведённого исследования	66
5.2 Методы и средства теоретического улучшения системы	83
5.3 Рекомендации практического характера.....	84
Заключение.....	87
Список используемой литературы	89

Введение

Математическое моделирование меняет представление о различных процессах, которые можно наблюдать в любых сферах деятельности человека, начиная от быта, заканчивая, но не ограничиваясь звёздными кластерами и другими сложно объяснимыми явлениями. Одним из таких явлений может являться артиллерийский выстрел, в течение которого протекают несколько различных процессов, которые позволяют условному снаряду покинуть ствольную часть артиллерийского орудия.

Преимущество огневой мощи необходимо в условиях боевых действий, причём учитывается даже не столько количество выставленных артиллерийских орудий, а насколько эффективно это орудие способно поражать противника. В отношении к артиллерийскому орудью учитываются такие параметры, как скорострельность, максимальная дальность поражения, начальная скорость снаряда и т.д. Изменения, необходимые для улучшения этих параметров, часто требуют кардинальных изменений в дизайне самого орудия, что означает необходимость разработки абсолютно новых конструкций с использованием наиболее современных доступных технологий, либо модификаций на базе существующей конструкции, которые могут привести к улучшению одного из параметров за счёт других, в зависимости от необходимости.

Построение математической модели артиллерийского выстрела может позволить конструктору рассчитать модель, используя различные параметры, такие как длины областей, состав и общий объём заряда, и т.д., чтобы выяснить, какое сочетание параметров даёт наибольший прирост для необходимого параметра артиллерийского орудия. В сочетании с современными вычислительными мощностями современных рабочих станций, у конструктора или экспериментатора появляется возможность значительно ускорить получение необходимых результатов после работы модели, а также повысить точность вычислений, избегая стандартизированных допущений и сокращений при вычислениях вручную.

Для данного исследования была поставлена научная проблема, которая заключается в том, что даже современные схемы метания, нуждающиеся в модификации, слишком часто обращаются к традиционным вычислениям и дорогостоящим стендам для экспериментов. Создание математической модели новой теоретической схемы метания и использование вычислительных мощностей современных персональных компьютеров и рабочих станций для её расчёта позволит гораздо быстрее и дешевле разработать новую схему метания или усовершенствовать имеющуюся, благодаря возможности протестировать полученную систему с разными параметрами, отсеивая неэффективные.

Целью исследования была поставлена разработка математической модели принципиально новой схемы метания, учитывающей энергетические газодинамические процессы, проходящие во время выстрела, программная реализация данной математической модели и получение результатов расчёта модели для сравнения с классической схемой метания.

Объект исследования представляет из себя внутрибаллистические газодинамические процессы, протекающие во время работы схемы метания.

Предмет исследования – принципиально новая схема метания и процессы, сопровождающие работу данной схемы.

Гипотеза: новая схема метания, приведённая в качестве математической модели, способна показать существенный прирост в скорости, сопоставимый с реальными испытаниями.

Задачи исследования:

1. Изучить используемые на данный момент схемы метания, как классические, так и нетрадиционные, экспериментальные и теоретические.
2. Выявить возможный прирост в скорости для каждой из приоритетных схем.
3. Определить наиболее перспективную схему метания для моделирования.

4. Составить математическую модель данной схемы, описывающую неотъемлемые энергетические газодинамические процессы, протекающие во время работы схемы.
5. Реализовать программный вариант построенной математической модели.
6. Провести анализ полученных результатов и сравнить их с результатами классической, оригинальной схемой метания.

Данное исследование направлено на раскрытие потенциала технической реализации математической модели схемы метания, в данном случае принципиально новой, чтобы появилась возможность проведения сравнения полученных результатов после отработки модели с существующими и используемыми сейчас реальными схемами метания, на основе которых были сконструированы образцы артиллерийских орудий.

Вопрос модернизации различных схем метания с целью увеличения начальной скорости снаряда уже затрагивался многими исследователями и авторами научных трудов. В рамках данного исследования будут собраны и проанализированы основные схемы метания и предложенные авторами из разных стран методы по возможным способам улучшения данных схем метания.

На данный момент до сих пор стоит вопрос получения схемы, способной обеспечить существенный прирост к выходной скорости снаряда, не прибегая к значительным изменениям в конструкции самого орудия, чтобы позволить уже существующим моделям артиллерийских орудий, стоящих на вооружении.

Научная новизна данного исследования заключается в получении новой схемы выстрела с выигрышем в начальной скорости снаряда относительно классической схемы метания, используя математическое моделирование газодинамических процессов, протекающих во время работы данной схемы, после программной реализации данной модели.

В рамках данного исследования были опубликованы две научные статьи, затрагивающие целесообразность использования эстафетной схемы метания

для систем среднего калибра. Статьи были опубликованы в рамках III научно-практической всероссийской конференции (школы-семинара) молодых ученых «Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук», проходившей 24-25 апреля 2017 года в г. Тольятти и в рамках IV научно-практической всероссийской конференции (школы-семинара) молодых ученых «Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук», проходившей 23-25 апреля 2018 года в г. Тольятти.

Объем и структура диссертации: диссертационное исследование состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографии (41 наименование). Работа изложена на 91 страницах, содержит 23 рисунка.

Глава 1 Теоретические основы классической и альтернативных схем метания

1.1 Актуальные вопросы систем выстрела

В современном мире, который до сих пор затронут гонкой вооружений прошлого и настоящего, совершенствование систем артиллерийского вооружения является неотъемлемой задачей наращивания боевой мощи. Работы отечественных [1, 2, 3, 4, 5] и зарубежных авторов [6, 7] были направлены на создание возможных улучшений в параметрах системы выстрела баллистических установок на порохе и артиллерийских орудий.

Задачи, указанные выше, направлены на решения проблем управления внутрибаллистическими процессами, в частности вноса и перераспределения энергии между элементами системы, и перспективнее всего выглядят неклассические схемы метания, основанные на переносе энергии порохового заряда на ускорение снаряда. Для того, чтобы экспериментально подтвердить результаты отработки таких схем, требуется огромное количество ресурсов, включающих временные и материальные затраты. На помощь приходит возможность создания математической модели процесса выстрела: на основе построенной модели появляется возможность анализа прохождения внутрибаллистических процессов, по итогам которого могут быть найдены закономерности функционирования новых схем, предложены новые требования к конструкции схемы для ускорения начальной скорости метаемого элемента.

Актуальным на данный момент считается вопрос по улучшению параметров, сопровождающих выстрел снаряда. Этот вопрос принято решать с помощью совершенствования уже существующей классической схемы выстрела, но также предлагаются принципиально новые схемы, среди которых наиболее популярными считаются двухступенчатые пушки, электродинамические системы и взрывные ускорители.

В случае совершенствования уже существующей схемы выстрела проводятся исследования по возможным модификациям, связанным с

увеличением заряда с сохранением давления как на дно канала, так и на всю заснарядную область.

1.2 Описание классической схемы метания

Классическая схема метания имеет связь с непосредственным процессом артиллерийского выстрела. Все процессы, происходящие внутри ствола с момента механического удара по капсюлю и до выхода снаряда из дульной области, рассматриваются внутренней баллистикой. При ударе по капсюлю, считается, что первый слой пороха, прилегающий ко дну области заряда, мгновенно воспламеняется и начинается превращаться в высокотемпературный газ. Со временем, пороховой заряд послойно продолжает горение, выделяя всё больше газа, вследствие чего происходит увеличение давления пороховых газов на стенки области и, соответственно, на донную область инертного тела, которым является снаряд. Под действием этого увеличивающегося давления снаряд начнёт движение по стволу. Объём пороховых газов за снарядом будет прогрессивно увеличиваться, так как процесс горения пороха всё ещё продолжается, до тех пор, пока весь заряд не выгорит. Тогда наступает момент времени, в который давление газов в камере начнёт уменьшаться, ибо объём области, которую может занимать этот газ, увеличивается вместе с расстоянием, которое проходит снаряд внутри ствола. После того, как днище снаряда покидает дульный срез, система перестаёт быть замкнутой и внутренней баллистикой более не покрывается.

С момента зажигания начального слоя заряда до момента вылета снаряда из ствола проходит очень короткий промежуток времени; настолько короткий, что в процессе расширения смеси пороховых газов не происходит значительного теплообмена с внешней средой, поэтому процесс можно считать адиабатическим.

Весь процесс выстрела, рассматриваемый внутренней баллистикой, делится на четыре основных этапа:

- предварительный;
- первый (основной);

- второй;
- период воздействия последствий горения газов.

Данное деление на периоды основано на возможности произведения математических расчетов величин давления газов и скорости снаряда для специфично для каждого из периодов.

Предварительный период включает временной промежуток от начала горения первого слоя порохового заряда (после удара по капсюлю) и до момента достижения давления форсирования, при котором начнётся движение снаряда по внутриствольной области.

Первый (основной) период описывает горение порохового заряда и действие появляющихся в процессе горения пороховых газов на ужедвигающийся снаряд. Период заканчивается, как только весь пороховой заряд полностью сгорит.

Второй период длится от момента полного сгорания порохового заряда до момента, в который снаряд покидает внутриствольную область и вылетает за дульный срез. Поскольку весь заряд на момент начала второго периода уже сгорел, приток пороховых газов прекращается, но они продолжают влиять на снаряд, увеличивая скорость за счёт расширения сжатых и сильно нагретых газов.

В рамках данного исследования производится оценка целесообразности конструкции схемы метания за счёт сравнения давления пороховых газов в соответствующих областях и скорость снаряда на момент пересечения левой границей снаряда дульного среза, поэтому последний период воздействия последствий горения газов не будет учитываться. Этот период подробно описывается промежуточной баллистикой и не входит в рамки проводимого исследования внутриствольных энергетических газодинамических процессов.

В процессе стрельбы ствол всегда подвергается износу, причём одной из причин, вызывающей износ ствола, является следствие работы в канале ствола пороховых газов, вызывающих давление, превышающее критическое давление, которое могут выдержать стенки ствола. Стволы изготавливаются толщиной,

способной обеспечить запас прочности, позволяющий стенкам ствола выдержать давление в 1,5 раза превышающее наибольшее.

При превышении критической величины давления пороховых газов (при пересечении запаса прочности ствола) может произойти раздутие или разрыв ствола, что приводит к неисправности ствольной системы и потере заявленных производителем характеристик.

Исходя из условия критического давления модернизация классического выстрела не может заключаться лишь в увеличении порохового заряда или применения более активной смеси порохов для увеличения давления в заснарядной области, тем самым вызывая увеличение скорости передвижения снаряда по стволу. Необходимы изменения в конструкции снаряда и области заряда.

Классический выстрел и пути его возможной модернизации были рассмотрены в трудах авторов всего мира [8, 9]. В основном принимается решение за счёт увеличения максимального давления на дно канала ствола, повышении $\frac{\omega}{q}$, вызванном увеличенной плотностью заряжания, улучшения энергетики пороха или смеси порохов, уменьшения веса продуктов сгорания порохов, увеличению дистанции, покрываемой снарядом внутри ствола, введением новых способов горения порохов. Основная и главная проблема таких подходов в модернизации схемы классического выстрела заключается в том, что при таких условиях прирост скорости снаряда по выходу из ствола не может составить более 3-5%. Сама система заряжания устанавливает критические ограничения, обусловленные огромными потерями энергии заряда на второстепенные работы.

В патенте Российской Федерации была предложена технология оснащения боеприпасов зарядами высокой плотности. Данная технология предусматривает увеличение плотности заряжания, что влечёт за собой увеличение давления на дно канала, что не может быть безопасным для стрелка. Для уменьшения давления, направляемого на дно канала при выстреле по данной технологии, пороховой заряд заменяется на другой, составом менее

агрессивный, чем используемый. Медленногорящий порох не успевает создать критическое давление на дно канала и внутри ствола, однако давление растёт достаточно быстро для ускорения снаряда. Прирост скоростей в этом случае незначителен и составляет порядка 3%.

1.3 Нетрадиционные схемы метания

Нетрадиционные схемы метания, напротив от классической схемы, могут быть исследованы в нескольких направлениях [1, 2, 10]:

- создание и совершенствование установок на лёгком газе;
- организация дополнительного заряда, присоединённого к снаряду;
- ввод дополнительной энергии в заснарядное пространство извне;
- использование комбинированных схем метания.

Большая часть из предложенных подходов составления конструкций и схем орудий и снарядов, являются чисто теоретическими, либо подходящими для использования исключительно в лабораторных условиях. Это объясняется факторами реального использования пушек, которое включает в себя использование дополнительных устройств для заряжания и сопровождения снаряда, пушки не обладают высокой скорострельностью и метают с большой скоростью тела небольшой массы. Унитарное заряжание является самым перспективным для использования в артиллерийских системах; такому принципу заряжания отвечают комбинированные схемы и схемы с присоединённым зарядом.

Введение присоединённого заряда способствует уменьшению второстепенных работ на перемещение газа, что считается более выгодным решением для получения более высоких скоростей снаряда по выходу из ствола. В работе [10] автором было отмечено, что при небольших значениях $\frac{\omega}{q}$ считается более выгодным использование комбинированной схемы метания: обычный пороховой заряд – присоединённый заряд. Схема была проанализирована в [11] на основе установки калибра 23 мм и показала возможный прирост в дульной скорости на 10%

Реализация схемы с присоединённым зарядом (СПЗ) может проводиться с использованием порохов обычного типа, предоставляя при этом прирост в скорости на 5-10% на установках среднего калибра $Cq = 3 \text{ кг/дм}^3$ при равных максимальных давлениях на дне канала и заряда. Помимо условий заряжания, величин Cq и $\frac{\omega}{q}$, прирост в скорости снаряда по выходу из ствола зависит также от обеспечений возможной задержки между воспламенением зарядов, основного и присоединённого. В случае малой задержки воспламенения может произойти слишком большой скачок давления на малом участке ствола, который может привести к разрыву, в случае большой задержки может произойти падение скорости снаряда во время прохождения по стволу, что приведёт к уменьшению скорости на выходе, вполне возможно меньшей, чем при выстреле классической схемы.

Исходя из условий обеспечения задержки воспламенения дополнительного заряда, используемого в СПЗ, вопрос об обеспечении такой задержки необходимо конструктивно проработать.

Поскольку, как указывалось ранее, лабораторные и практические испытания несут большие затраты времени и материалов, оценки и прогнозирование могут быть проведены на основе математических моделей, описывающих рассматриваемые процессы. Математические модели при этом могут быть различного уровня сложности, предоставляющие качественное и/или количественное описание рассматриваемых процессов.

Для описания внутрибаллистических процессов существует иерархия моделей [1, 2, 4]:

1. термодинамическая;
2. модель газопороховой смеси;
3. модели с учётом отставания порохового зерна, разработанные на основе подходов механики гетерогенных сред;

и известны критерии их применимости для достаточно корректного количественного описания внутрибаллистических процессов.

1.4 Обзор патентов

На основе уже реализованных моделей могут сформулированы более точные модели для описания внутрибаллистических процессов других конструкций.

В патентах ФРГ и США уже рассматривались системы выстрела с разделением заряда и организованной задержкой зажигания дополнительного заряда. В патенте ФРГ часть заряда располагалась в полости, которая в начальный момент времени перекрывается перегородкой, которая, при достижении определённого давления на снаряде, ломается, обеспечивая приток горячего газа, используемого для воспламенения дополнительного заряда [11]. Однако, перегородка ломается ещё до достижения максимального давления на снаряде. После воспламенения дополнительного заряда в данной схеме появляются слишком высокие скачки давления. Исходя из некорректного сравнения максимальных давлений на дно систем классического и предложенного выстрела, вывод о возможном выигрыше в начальной скорости метания снаряда не является корректным.

В схеме патента США тепловыделение дополнительного заряда больше тепловыделения основного заряда [12]. Между основным и дополнительным зарядом вставлена таблетка, собранная из пороха с меньшей скоростью горения, чем у дополнительного заряда, что приводит к воспламенению только при падении давления от продуктов сгорания основного заряда и отсутствии опасных всплесков давления в камере.

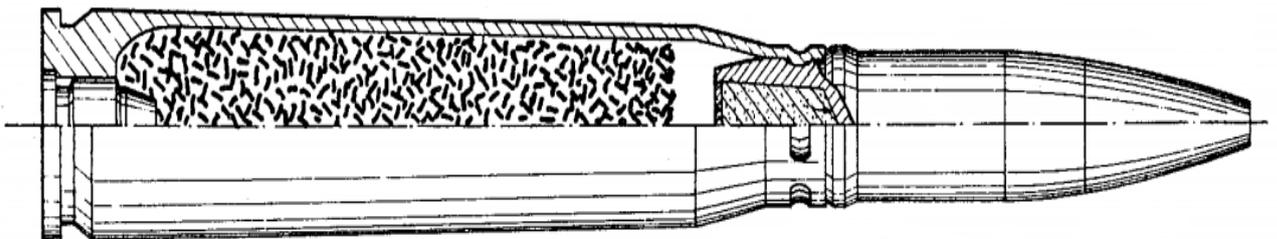


Рисунок 1.1 Схема патента США 3724377

Патент не обуславливает возможный выигрыш в скорости метаемого элемента на момент выхода из ствола, в сравнении с классической схемой метания.

Далее будут рассмотрены схемы многоступенчатого порохового выстрела, позволяют улучшить индикаторную диаграмму и повысить скорость метаемого элемента, благодаря этому фактору.

В патенте США была предложена схема двухступенчатой пороховой установки, имеющей расположенные друг за другом у дна камеры основной и дополнительный заряды, разделенные подвижным поршнем, имеющим устройство остановки обратного хода [13].

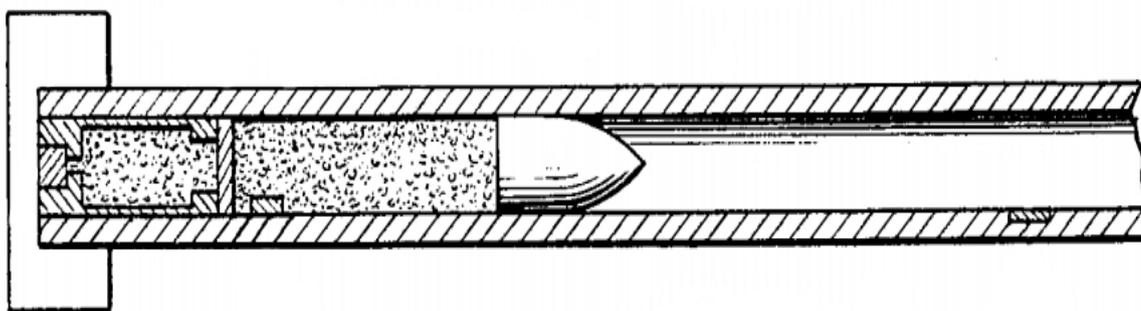


Рисунок 1.2 Схема патента США 3388633

Для установок подобного рода характерно, что за счет поджатия поршнем порохового газа дополнительного заряда, повышается давление на снаряде и, благодаря этому, увеличивается начальная скорость. В работе исследовалась баллистика установки, в канале ствола которой располагался дополнительный заряд, отделенный от основного легким диском, соединенным со снарядом стержнем. Предполагалось, что оба заряда воспламеняются одновременно в начальный момент времени. Контроль зажигания зарядов контролировался с помощью электрической схемы и зажигателей, размещённых внутри ствола. В основной камере располагался более острый порох. До момента разрыва стержня, под действием давления порохового газа, вся сборка (диск,

дополнительный заряд, снаряд) движется как единое целое. После разрыва стержня снаряд начинает самостоятельное движение по каналу ствола. Приведенный эффект повышения начальной скорости снаряда на 14%, по сравнению с обычной схемой выстрела, в основном связан с увеличением веса заряда в системе примерно в полтора раза против обычного.

Из большого числа схем выстрелов, позволяющих улучшать индикаторную диаграмму, рассмотренных в патенте Великобритании, стоит отметить схемы с разделением заряда, где разделительный поршень снабжен регулирующим объемом, обеспечивающим задержку зажигания дополнительного заряда с возможностью регулирования в широких пределах [8]. Стоит заметить, что для рассмотренной в патенте схемы не приведен предполагаемый баллистический эффект.

Из анализа работы приведенной схемы следует, что энергия основного заряда, предназначенная для ускорения используемой при метании радиально недеформируемой оболочки, заключающей дополнительный заряд, тратится бесполезно.

Таким образом, рассмотренный анализ баллистических возможностей различных реализованных схем выстрела показал, что они могут давать выигрыш в начальной скорости не более 10% по сравнению с классической схемой.

1.5 Газодинамический метод в схемах метания

Наиболее популярным методом, используемым при рассмотрении свойств газов и их изменении, считается термодинамический метод.

Необходимо отметить, что газодинамический метод даёт более полную информацию о процессе выстрела и является принципиально более точным по сравнению с термодинамическим методом. Однако в практике баллистического проектирования зарядов и конструирования артиллерийских систем возможности любого метода, в том числе и газодинамического, ограничены рамками той физической модели, которую он описывает.

О необходимости усовершенствования физической модели явления выстрела и более строгого её математического описания говорят экспериментальные работы. Результаты этих работ указывают, что на баллистику выстрела оказывают влияние конструкция заряда, условия воспламенения пороха, вес и расположение воспламенителя.

В работе [14] применяется математическая модель процесса выстрела на основе газодинамического подхода, разработанная применительно к классическому выстрелу.

Важнейшими условиями успешного управления любым процессом являются своевременное получение достоверной информации, ее оперативный и качественный анализ, наглядное представление результатов. Эти требования в настоящее время особенно актуальны при управлении процессом выстрела - сложнейшей системой, в которой протекают множество процессов, существенно влияющих друг на друга.

Необходимо для принятия качественных решений комплексно решать такие задачи как:

- учет постепенного горения зарядов сложной формы;
- взаимодействие различных волновых процессов в процессе выстрела;

Как известно, от скорости притока нового газа в результате горения поверхности зависит рост давления. Это можно сформулировать в закон зависимости развития давления пороховых газов от притока газов с горящего топлива. При этом, скорость притока газа прямо зависит от линейной скорости горения вещества, а также от площади горячей поверхности. Чем больше площадь горячей поверхности, тем больше вещества участвует в газообразовании из-за процесса горения.

Поставим мысленный эксперимент, в котором в конкретный момент времени скорость горения имеет одинаковое значение для всей поверхности (площади) горения. Чтобы такое было осуществимо, необходимо обеспечивать

условия, в которых поверхность всех зёрен заряда горела равномерно и одинаково.

Допустим, все зёрна заряда имеют строго одинаковые размеры (пропорции), их масса однородна и воспламенятся одновременно, то в таком случае все зерна заряда будут за одинаковое время прогорать на идентичную глубину зерна. Это означает, что при постановке вычислительного эксперимента все зерна заряда можно представить, как горение одного и того же зерна. При этом не следует забывать, что в реальных условиях при горении порохового вещества в орудиях может отклоняться от геометрического закона ввиду неоднородного воспламенения вещества, ввиду неоднородности массы и неравномерных условий для всех пороховых элементов. Тем не менее среднее отклонение при качественно поставленных условиях незначительно и может быть проигнорировано.

В практике широко применяется геометрический закон. Он позволяет получать четкие аналитические зависимости для дальнейших расчетов давления пороховых газов, а также позволяет с высокой точностью рассчитывать скорость снаряда.

Известно, что в артиллерии используются пороха различных форм. Однако преобладающей формой является многоканальный порох, так как многоканальные зёрна заряда горят с распадом своей формы. Такая форма пороха может быть с узкими и длинными или широкими и короткими каналами (полостями). Горение зерна с короткими широкими каналами будет лишь незначительно отличаться от горения зерна без каналов, а вот в случае узких и длинных каналов происходит совершенно иное.

Возьмем для примера порох с зерном, содержащим узкий длинный канал. Если рассмотреть такой порох с использованием узких каналов, то видно, что пропорция отношения длины порохового канала к его диаметру очень большая. Настолько большая, что становится существенным различие в условиях воспламенения и горения внутри порохового канала на наружной поверхности.

Внутри узких и вытянутых каналов формируются такие условия, которые способствуют повышению давления в них в большей степени, чем на внешней поверхности горящего зерна. Если бы давление было равным, то пороховые газы не смогли бы выходить из каналов наружу, что невозможно при ограниченных объемах внутри канала. Это бы противоречило физической сути явления. Потому, на основе выведенных зависимостей можно смело доказать, что скорость прироста давления внутри каналов будет значительно больше, чем скорость роста давления снаружи поверхности горящего зерна пороха. Это приведет к неизбежному росту давления внутри каналов и выбросу газов наружу.

Таким образом, можно заключить, что скорость роста давления внутри зерен пороха с семью каналами значительно больше, чем на наружной поверхности зерна. А значит и значение давления тоже будет все выше и выше. Разница давлений приведет к истечению газов из горящих каналов. Система будет стремиться к выравниванию давления. Однако скорость горения вещества происходит очень быстро и обгоняет скорость выравнивания давления.

Отсюда можно сделать вывод, что узкие и длинные каналы в пороховых зернах создают неравномерные условия горения на различных поверхностях пороха. К пороховым частицам, обладающим подобными свойствами, неприменим геометрический закон горения, что приводит к необходимости рассмотрения процесса горения таких порохов рамках другой теории. Это назвали «неравномерной теорией горения», она описывает процессы горения таких форм пороха.

Строгое и точное решение задач, связанных с горением таких форм пороха (с узкими длинными каналами), само по себе является чрезвычайно сложной комплексной газодинамической задачей. В такой задаче необходимо учитывать непрерывное газообразование на поверхностях каналов, которое со временем добавляется в общую массу газов в камере.

При построении моделей таких систем существует целый ряд проблем, требующих обязательного решения.

Таким образом, актуальная проблема — отсутствие математических моделей, позволяющих описывать процессы в баллистических системах новых компоновок, послужила основанием к проведению данного исследования.

1.6 Предпосылки к эстафетной схеме

Подобную задачу метания, которая рассматривается в этой диссертации, впервые поставил и рассматривал В. Н. Вилунов. Первые работы с формулировкой задачи были опубликованы в 1969 году. Они содержали исследования возможности достижения куда более высоких скоростей для схем метания типа «порох ↔ поршень ↔ порох (ППП)», чем в классических схемах выстрела из ПБУ [15].

Основной принцип метания был назван «эстафетным». Он заключается в том, чтобы последовательно воздействовать пороховыми газами поршень и метаемый снаряд. Эти пороховые газы получаются в результате сгорания отдельной части заряда. Они последовательно ускоряют метаемый элемент. Схемы метания, которые используют такой принцип, здесь и далее будем называть эстафетными.

Следует обратить внимание на то, что в ПБУ эстафетной схемы выстрела движущийся поршень позволяет перераспределять и сообщать энергию снаряду, начавшему движение вместе с толкающим поршнем. Это отличает схему от обычных двухступенчатых установок.

Именно такая схема может быть использована для разгона снаряда в системах с ограниченной длиной каналов стволов орудий благодаря возможности перераспределения энергии. Такое полезное качество может быть применено в соответствующих комплексах и поможет создать такую конфигурацию, которая будет соответствовать возможным требованиям к габаритам орудия.

Предлагается разгонять контейнер со снарядом и воспламенять его пороховой заряд с определенной задержкой зажигания после срабатывания

основного заряда для того, чтобы повысить начальную скорость метания снаряда из ПБУ. Рассмотрим последовательно как работает такая установка:

- в начальный момент времени в этой системе поджигается основной заряд от капсулы воспламенителя;
- когда давление достигает точки форсирования, поршень (вместе с дополнительным или контейнерным зарядом и снарядом) приходит в движение;
- через определенное время задержки зажигания воспламеняется дополнительный заряд от раскаленных продуктов горения, образованных основным зарядом;

С целью повышения КПД и стабильности воспламенения второго заряда используются специальное воспламенительное устройство. Оно может быть выполнено в виде перфорированного цилиндра, жестко прикрепленного к поршню соосно с отверстием в нем. Время задержки поджигания дополнительного заряда в контейнере можно регулировать диаметром отверстия в поршне, а также количеством, расположением и диаметрами отверстий в перфорированном цилиндре.

До момента воспламенения дополнительного заряда энергия порохового газа от основного заряда будет преобразовываться в кинетическую энергию толкаемого контейнера. Это в конечном результате должно привести к увеличению переносной скорости метаемого газа от второго заряда. После зажигания движущегося контейнера с дополнительным зарядом осуществляется сообщение ускорение под действием давления пороховых газов, образованных в контейнере между поршнем и метаемым снарядом. Это ускорение будет в разы больше, чем ускорение самого поршня от расширяющихся газов основного заряда. В кульминации этого процесса снаряд отделяется от дополнительного контейнера и начинает свое движение вдоль канала ствола под суммированным воздействием. Сам поршень будет замедляться под противодействием расширяющихся газов второго заряда, но не

остановит своего движения до момента, пока давление с обеих сторон не выровняется.

Используя такую схему поджигания, значительно повышается КПД основного заряда, так как им ускоряется большая масса. КПД всей метательной системы значительно возрастает, так как заряд контейнера и снаряд на момент поджигания уже будут разогнаны. Энергия сработавшего дополнительного заряда (расширяющихся пороховых газов после поджигания заряда) будет передаваться в большей степени снаряду, так как расширение газов в сторону толкающего поршня (замедление поршня) пренебрежительно мало из-за уже разогнанной массы газов со стороны основного заряда.

Сравнивая эту систему с классическим способом разгона, можно ожидать возрастания скорости метаемого снаряда за счет поочередного перераспределения энергии. По этой причине принцип и был назван эстафетным.

Глава 2 Математическая модель эстафетной схемы

2.1 Описание эстафетной схемы

В данном разделе описывается процесс работы системы выбранной схемы выстрела с присоединенным дополнительным зарядом к снаряду на основе модели газопороховой смеси. Приведем все в соответствии с физической постановкой задачи, описанной в пункте 1.6.

В начальный момент времени воспламеняется главный (первый) заряд, расположенный в первой расчетной области. Рассчитываемое давление, образуемое в следствии горения заряда, приведет систему в движение. Снаряд с дополнительным зарядом в контейнере приходит в движение под действием толкаемого поршня. Таким образом, все вычисления до момента воспламенения дополнительного заряда производятся в области основного заряда.

В момент времени, равного указанной задержке, когда производится зажигание дополнительного заряда, начинается расчет системы отработки этого заряда. В расчетную систему включается вторая область, находящаяся между движущимся поршнем и снарядом.

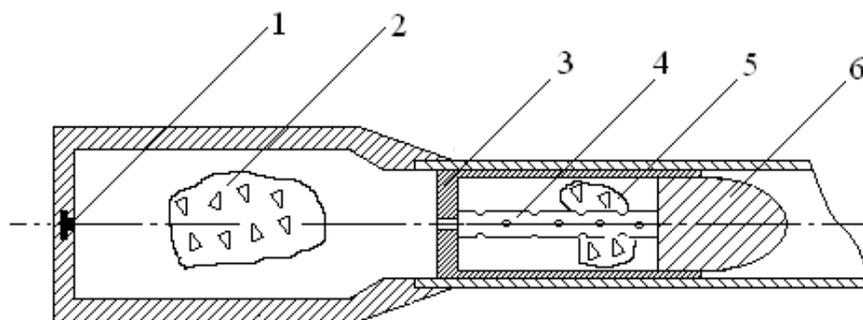


Рисунок 2.1 – Схема установки с присоединённым зарядом.

1 – капсюль-воспламенитель; 2 – основной заряд; 3 – поршень контейнера; 4 – перфорированная трубка; 5 – дополнительный заряд; 6 – снаряд.

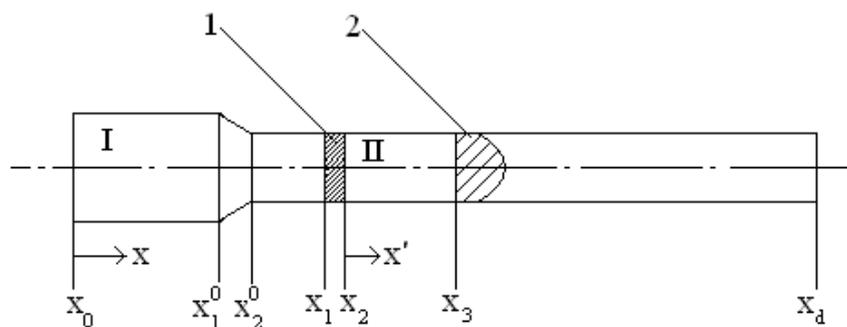


Рисунок 2.2 – Расчётная схема установки с присоединённым зарядом.

1 – поршень контейнера; 2 – метаемый элемент.

Для удобства проведения расчетов используются индивидуальные для каждой из областей системы координат (Рисунок 2.2). Получаемые решения стыкуются на подвижной границе между областями. Решение ПЗВБ систем эстафетной схемы выстрела или систем с ускоряемым контейнером дается модифицированным методом СЭЛ, апробированным для использования в расчетах ПБУ.

2.2 Двухскоростная среда

Для решения прямой внутрибаллистической задачи, описывающей систему с ускоряемым контейнером, представленным на Рисунок 2.2, приводятся некоторые допущения:

- в состав заряда входят зёрна пороха малого размера;
- зерна пороха имеют скорость, равную скорости окружающих пороховых газов;
- начальный слой каждого заряда пороха зажигается посредством мгновенного охвата пламенем в момент времени, соответствующий времени зажигания;
- следует пренебречь теплоотдачей и трением газа, появляющееся на стенках ствола и камеры;
- при достижении определённого уровня давления (давления форсирования) начинается движение сборки;

- процесс горения зёрен пороха происходит в соответствии с геометрическим законом горения;
- объём перетёкших газов в сборку не учитывается.

С помощью переменных инерциальной системы координат выражаем кинематические переменные в неинерциальной системе координат. После введения обозначения штриха ' для новых параметров, получаем:

$$x' = x - \int_0^t v d\tau - x_0, \quad u' = u - v, \quad t' = t.$$

Дифференциальные операторы по независимым переменным в таком случае будут следующими:

$$\frac{\partial}{\partial x'} = \frac{\partial}{\partial x}, \quad \frac{\partial}{\partial t'} = \frac{\partial}{\partial t} - v \frac{\partial}{\partial x}.$$

После того, как штрихи ' , введённые для новых параметров, будут опущены, система уравнений примет следующий вид:

$$\frac{\partial \rho S}{\partial t} + \frac{\partial \rho u S}{\partial x} = 0;$$

$$\frac{\partial \rho u S}{\partial t} + \frac{\partial \rho u^2}{\partial x} + S \frac{\partial \rho}{\partial x} = -\rho S \frac{\partial v}{\partial x};$$

$$\frac{\partial \rho u S}{\partial t} + \frac{\partial \rho \varepsilon u S}{\partial x} + p v \frac{\partial S}{\partial x} + p \frac{\partial S u}{\partial x} = S \Pi \rho \frac{\partial \psi}{\partial t} + u \frac{\partial \psi}{\partial x};$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + u \frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{p}{\chi^2 + 4\chi\lambda\psi} \frac{p}{I_k};$$

$$\psi = \chi z + \lambda z;$$

$$\varepsilon = \frac{p}{k-1} \frac{1}{\rho} - \frac{1-\psi}{\delta} - a\psi.$$

Для расчёта обеих областей используется только одна эта система. Из этой же системы можно вывести уравнения, позволяющие вести расчёты в инерциальной системе координат.

Начальные и граничные условия:

1. При $t = 0$, $0 \leq x \leq x_1$:

$$u_I = 0, \quad \rho_I = \Delta_I, \quad p_I = p_\Phi, \quad \psi_I = \frac{\frac{1}{\Delta_I} - \frac{1}{\delta_I}}{\frac{f_I}{p_I} + \alpha_I - \frac{1}{\delta_I}}.$$

2. При $t = 0$, $x_2 \leq x \leq x_3$:

$$u_{II} = 0, \quad \rho_{II} = \Delta_{II}, \quad p_{II} = p_a, \quad \psi_{II} = 0.$$

3. При $t = t_3$, $x_2 \leq x \leq x_3$:

$$u_{II} = 0, \quad \rho_{II} = \Delta_{II}, \quad p_I = p_B, \quad \psi_{II} = \frac{\frac{1}{\Delta_{II}} - \frac{1}{\delta_{II}}}{\frac{f_{II}}{p_{II}} + \alpha_{II} - \frac{1}{\delta_{II}}}.$$

4. При $x = 0$, $t \geq 0$:

$$u = 0.$$

5. При $x = x_1$, $t \geq 0$:

$$\frac{du_1}{dt} = \begin{cases} \frac{S}{Q} p_1 - \frac{f_{CB}}{S}, & \frac{p_1 - p_2}{Q_\Gamma} \geq \frac{p_3}{q} \\ \frac{S}{Q_\Gamma} p_1 - p_2, & \frac{p_1 - p_2}{Q_\Gamma} < \frac{p_3}{q} \end{cases};$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{du_1}{dt}$$

6. При $x = x_2$, $t \geq 0$:

$$u_2 = 0.$$

7. При $x = x_3$, $t \geq 0$:

$$0, \quad \frac{p_1 - p_2}{Q_\Gamma} \geq \frac{p_3}{q}$$

$$\frac{du_3}{dt} = \frac{S p_3 - \frac{f_{CB}}{S}}{q} - \frac{dv}{dt}, \quad \frac{p_1 - p_2}{Q_\Gamma} < \frac{p_3}{q};$$

$$f_{CB} = p_{BH} + \frac{k+1}{2} \rho_{BH} u^2 \quad S - \text{ по формуле прямого скачка.}$$

Для решения система уравнений приводится к безразмерному виду. В качестве масштабных величин выбраны: $L_{\text{км}} = x_1, t_0 = \frac{L_{\text{км}}}{c_0}$

$$p_0 = \frac{f_I \Delta}{1 - \alpha_I \Delta}, \quad C_0^2 = \frac{p_0}{\Delta}, \quad \Delta = \frac{\omega_I}{w_I}, \quad \text{если } \frac{\omega_I}{w_I} \geq \frac{\omega_{II}}{w_{II}};$$

$$p_0 = \frac{f_{II} \Delta}{1 - \alpha_{II} \Delta}, \quad C_0^2 = \frac{p_0}{\Delta}, \quad \Delta = \frac{\omega_{II}}{w_{II}}, \quad \text{если } \frac{\omega_I}{w_I} < \frac{\omega_{II}}{w_{II}};$$

Здесь:

x_1 – начальная координата положения поршня;

ω_I, ω_{II} – массы составов в областях;

w_I, w_{II} – объёмы областей;

$L_{\text{км}}$ – масштаб длины;

t_0 – масштаб времени;

p_0 – масштаб давления;

C_0 – масштаб скорости.

Относительные переменные примут вид:

$$\tau = \frac{t}{t_0}, \quad u = \frac{u}{C_0}, \quad x = \frac{x}{L_{\text{км}}}, \quad p = \frac{p}{p_0}, \quad \rho = \frac{\rho}{\Delta}, \quad \varepsilon = \frac{\varepsilon}{C_0^2}.$$

Далее знак «черта» у переменных убирается. На безразмерный характер уравнений в дальнейшем будет указывать τ .

Для простоты введем следующие замены:

$$\rho S \rightarrow \rho, \quad \rho u S \rightarrow M, \quad \rho \varepsilon S \rightarrow \varepsilon.$$

Переходя в исходной системе уравнений начальных и граничных условиях к относительным переменным, с учетом замен, получим:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} = 0;$$

$$\frac{\partial M}{\partial \tau} + \frac{\partial Mu}{\partial x} + S \frac{\partial \rho}{\partial x} = -\rho \frac{\partial v}{\partial \tau};$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} + \frac{\partial \varepsilon u}{\partial x} + p \frac{\partial Su}{\partial x} = \Pi \rho \frac{\partial \psi}{\partial \tau} + u \frac{\partial \psi}{\partial x} - p v \frac{dS}{dx};$$

(2.1)

$$\frac{\partial \psi}{\partial \tau} + u \frac{\partial \psi}{\partial x} = \overline{\chi^2 + 4\chi\lambda\psi A};$$

$$\psi = \chi z + \lambda z;$$

$$\varepsilon = \frac{p\rho}{\theta} \frac{S}{\rho} - \frac{1-\psi}{\delta} - a\psi,$$

где $\theta = k - l$, $A = \frac{\Delta L_{\text{км}} C_0}{I_{\text{к}}}$.

Начальные и граничные условия:

1. При $\tau = 0$, $0 \leq x \leq 1$:

$$u_I = 0, \quad \rho_I = \Delta_I S, \quad p_I = p_{\Phi}, \quad \psi_I = \frac{\frac{1}{\Delta_I} - \frac{1}{\delta_I}}{\frac{f_I}{p_I} + \alpha_I - \frac{1}{\delta_I}}.$$

2. При $\tau = 0$, $x_2 \leq x \leq x_3$:

$$u_{II} = 0, \quad \rho_{II} = \Delta_{II} S, \quad p_{II} = p_a, \quad \psi_{II} = 0.$$

3. При $\tau = \tau_3$, $x_2 \leq x \leq x_3$:

$$u_{II} = 0, \quad \rho_{II} = \Delta_{II} S, \quad M_{II} = \rho_{II} u_{II}, \quad p_I = p_B,$$

$$\psi_{II} = \frac{\frac{1}{\Delta_{II}} - \frac{1}{\delta_{II}}}{\frac{f_{II}}{p_{II}} + \alpha_{II} - \frac{1}{\delta_{II}}}.$$

При $x = 0$, $\tau \geq 0$:

$$u = 0.$$

При $x = x_1$, $\tau \geq 0$:

$$\frac{du_1}{d\tau} = \frac{B}{Q} S p_1 - \frac{f_{CB}}{S_{KM}}, \quad \frac{p_1 - p_2}{Q_\Gamma} \geq \frac{p_3}{q};$$

$$\frac{B}{Q_\Gamma} (S p_1 - p_2), \quad \frac{p_1 - p_2}{Q_\Gamma} < \frac{p_3}{q};$$

$$\frac{dv}{d\tau} = \frac{du_1}{d\tau}$$

При $x = x_2, \tau \geq 0$:

$$u_2 = 0.$$

При $x = x_3, \tau \geq 0$:

$$0, \quad \frac{p_1 - p_2}{Q_\Gamma} \geq \frac{p_3}{q}$$

$$\frac{du_3}{dt} = \frac{B p_3 - \frac{f_{CB}}{S_{KM}}}{q} - \frac{dv}{d\tau}, \quad \frac{p_1 - p_2}{Q_\Gamma} < \frac{p_3}{q};$$

$$B = S_{KM} \Delta L_{KM},$$

f_{CB} – по формуле прямого скачка.

Величины $\frac{B}{Q}, \frac{B}{Q_\Gamma}, \frac{B}{q}$ – безразмерные.

Система гиперболических уравнений с соответствующими начальными и граничными условиями может решаться методом СЭЛ (совместный Эйлера-Лагранжевый метод).

2.3 Математическая модель

Обусловленные в разделе 2.2 условия постановки задачи позволяют описать процессы, происходящие в обеих областях, разграниченных поршнем, с помощью системы уравнений на основании системы (2.1), для которых необходимо учитывать протекание процесса в разных системах координат, устанавливаемых для обеих областей.

Процессы, которые протекают в области I, необходимо описывать с помощью системы уравнений, которая будет записана именно в инерциальной системе координат (x, t) ; аналогичная система уравнений должна описывать процессы, которые протекают в области II, причём эта система уравнений должна быть описана в неинерциальной системе координат, которую

необходимо связывать с правой границей поршня (x', t) (Рисунок 2.2 Рисунок 1.1).

Система уравнений, одновременно описывающая процессы, протекающие как в области I, так и в области II, в различные моменты времени, приводится ниже:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho S \varphi + \frac{\partial}{\partial x} \rho S \varphi u = M; \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho S \varphi u + \frac{\partial}{\partial x} \rho S \varphi u^2 + p S \varphi = M \omega - \tau_{\text{тр}} + p \frac{\partial \varphi S}{\partial x} - N \rho S \varphi \frac{du_{\text{II}}}{dt}; \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \rho S \varphi E + \frac{\partial}{\partial x} S \varphi u \rho E + p \\ = -p \frac{\partial (1 - \varphi) S \omega}{\partial x} - \tau_{\text{тр}} \omega + M \left(Q + \frac{u^2}{2} \right) - N \rho S \varphi u \frac{du_{\text{II}}}{dt}; \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_2 S (1 - \varphi) + \frac{\partial}{\partial x} \rho_2 S (1 - \varphi) \omega = -M; \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \rho_2 S (1 - \varphi) \omega + \frac{\partial}{\partial x} \rho_2 S (1 - \varphi) \omega^2 + (1 - \varphi) S \frac{\partial p}{\partial x} \\ = \tau_{\text{тр}} - M \omega - N \rho_2 (1 - \varphi) S \frac{du_{\text{II}}}{dt}; \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \omega \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{a_1 p}{e_b}; \quad (2.7)$$

$$p \frac{1}{\rho} - \alpha = RT; \quad (2.8)$$

$$E = \varepsilon + \frac{u^2}{2};$$

$$\varphi = 1 - n \Lambda_0 (1 - \psi z);$$

$$\psi z = \chi_1 z (1 + \lambda_1 z);$$

$$\sigma z = 1 + 2 \lambda_1 z;$$

$$M = SnS_{02}\rho_2\sigma(z)a_1p;$$

$$M' = S'n'S'_{02}\rho'_2\sigma z' a'_1p'e t' - t'_3 ;$$

$$\tau_{TP} = \frac{1}{2} C_x \rho u - \omega u - \omega S_n \frac{\pi d_{op}^2}{4} 1 - \psi z^{\frac{2}{3}};$$

$$C_x = \begin{cases} \frac{24}{Re} + 0.48, & 0 < Re < 3 * 10^5; \\ 0.1, & Re \geq 3 * 10^5 \end{cases};$$

$$Re = \frac{\rho u - \omega \varphi \overline{S_{02}}}{\mu}.$$

Система уравнений (2.2) – (2.8) при $N = 0$ описывает процессы в области I, при $N = 1$ и замене параметров и переменных на соответствующие им параметры и переменные со штрихом ' ($u \equiv u'$ и т. д.) описывает процессы в области II, происходящие уже после разделения сборки (с момента времени t_1).

В системе уравнений (2.2) – (2.8):

- (2.2) – уравнение сохранения массы газа;
- (2.3) – уравнение импульса газа;
- (2.4) – уравнение энергии газа;
- (2.5) – уравнение сохранения массы частиц пороха;
- (2.6) – уравнение импульса пороха;
- (2.7) – уравнение для относительной толщины прореагировавшего слоя частиц;
- (2.8) – уравнение состояния.

Начальные условия для области I:

$$T_{x,0} = T_G; p_{x,0} = p_\Phi; u_{x,0} = \omega_{x,0} = 0; \varphi_{x,0} = \varphi_H;$$

$$\psi_H = \frac{\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{\rho_2}}{\frac{f}{p_\Phi} + \alpha - \frac{1}{\rho_2}}; z_H = \frac{2\psi_H}{\kappa_1(1 + \sigma_H)}; \sigma_H = \frac{\lambda_1}{\kappa_1} \psi_H. \quad (2.9)$$

Начальные условия для области II:

$$\begin{aligned} T' x', t_1 &= T'_G x' ; p' x', t_1 = p' x ; u' x', t_1 \\ &= u' x' ; \omega' x', t_1 = 0; \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\varphi' x', t_1 = \varphi' x' ; z' x', t_1 = z'(x').$$

Граничные условия:

$$u \ 0, t = \omega \ 0, t = 0; u \ x_{\Pi}, t = \omega \ x_{\Pi}, t = u_{\Pi}; \quad (2.11)$$

$$u' \ 0, t = \omega' \ 0, t = 0; u' \ x'_{\Pi}, t = \omega' \ x'_{\Pi}, t = u'_{\Pi},$$

где:

x_{Π} – координата поршня;

x'_{Π} – координата метаемого элемента;

u_{Π} – скорость поршня;

u'_{Π} – скорость метаемого элемента.

Значения вышеуказанных переменных определяются интегрированием уравнений движения полной сборки и движения поршня и элемента после разделения сборки.

$$\begin{aligned} m_{сб} \frac{du_{\Pi}}{dt} &= p_1 S \\ q'_{\Pi} \frac{du'_{\Pi}}{dt} &= 0 \end{aligned} \quad , t \leq t_2; \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} q_{\Pi} \frac{du_{\Pi}}{dt} &= (p_1 - p_2) S \\ q'_{\Pi} \frac{du'_{\Pi}}{dt} &= p_3 S - q'_{\Pi} \frac{du_{\Pi}}{dt} \end{aligned} \quad , t > t_2, \quad (2.13)$$

где:

p_1 – давление на поршень слева (из области I);

p_2 – давление на поршень справа (из области II);

p_3 – давление на метаемый элемент слева (из области I);

$m_{сб}$ – масса полной сборки;

q_{Π} – масса поршня;

q'_{Π} – масса метаемого элемента.

В момент времени t_2 , когда ускорение метаемого элемента станет больше ускорения поршня под действием давления, происходит разделение сборки по выполнению условия:

$$p_3 > \frac{q'_\Pi}{q_\Pi} p_1 - p_2 . \quad (2.14)$$

Обозначения:

t – время;

x – координата;

u – скорость газа;

ω – скорость конденсированной фазы;

p – давление;

ρ – плотность газа;

ρ_2 – плотность вещества пороха;

T – температура;

φ – пористость;

E, ε – полная и внутренняя энергия единицы объёма газа;

S – площадь поперечного сечения канала ствола;

z – относительная толщина сгоревшего свода;

M – скорость массоприхода от горения пороха;

$\tau_{\text{ТР}}$ – сила взаимодействия между твёрдой и газообразной фазами;

$\frac{du_\Pi}{dt}$ – ускорение поршня;

Q – тепловой эффект горения пороха;

R – универсальная газовая постоянная;

α – коволюм;

e_B – толщина горящего свода зерна пороха;

a_1, v – коэффициенты в законе скорости горения;

n – концентрация вещества в частице;

Λ_0 – начальный объём частицы пороха;

$\psi(z)$ – относительный сгоревший объём частицы пороха;

χ_1, λ_1 – коэффициенты формы частиц пороха;

S_{02} – начальная площадь частиц пороха;

$\sigma(z)$ – относительная горящая поверхность частицы пороха;

C_x – коэффициент сопротивления;

d_{op} – диаметр шара, эквивалентного по объёму частице пороха;

Re – число Рейнольдса;

μ – вязкость газа;

t_3 – момент зажигания частиц пороха присоединённого заряда;

$e(t' - t'_3)$ – функция Хевисайда.

Данная система уравнений с установленными соотношениями (2.2) – (2.8), начальными условиями (2.9) – (2.10), граничными условиями (2.11) – (2.13) и условием разделения сборки (2.14), решается в каждой точке расчётной области, определяя параметры процесса работы схемы с присоединённым зарядом.

Численное решение системы уравнений (2.2) – (2.8) совершается с использованием разностного метода численного расчёта уравнений распада произвольного разрыва, также известный как метод Годунова [16]. Для такого метода ведётся решение задачи распада произвольного разрыва на скачке сечения, что позволяет определить на обеих границах расчётных ячеек параметры газа, такие как потоки газа, импульса и энергии [17]. С помощью решения задачи о распаде произвольного разрыва параметров газа на непроницаемой поверхности определяются давления p_1, p_2, p_3 , необходимые для решения уравнений (2.12), (2.13), где решение совершается с использованием метода Эйлера.

В системе уравнений (2.2) – (2.13) для области II определяются начальные условия из решения задачи зажигания начальных слоёв частиц пороха за счёт потока горячих газов, протекающих в область I через перфорированную трубку регулирующего объёма (Рисунок 2.1).

Исходя из допущений поставленной задачи, было предположено, что отверстия в перфорированной трубке (номер 4 на Рисунок 2.1), ведущие в

регулирующий объём с зарядом 5, вскрываются при достижении определённого давления форсирования $p_{\Phi 1}$, а выходные отверстия – при достижении определённого давления форсирования $p_{\Phi 2}$. Ниже приведена система уравнений, записанная в неинерциальной системе координат (x', t) , связанной с поршнем, которая описывает процессы, проходящие в регулирующем объёме и области II до момента времени t_1 , когда на поверхности всех частиц области II было совершено зажигание начального слоя частицы пороха. Система уравнений записана в системе координат (x', t) с началом на входе отверстия в регулирующий объём с длиной l . По длине регулирующего объёма расположены равномерно распределённые боковые отверстия, вскрываемые при достижении определённого давления форсирования $p_{\Phi 2}$. Частицы пороха до горения в области II до момента времени t_1 рассматриваются статическими относительно поршня.

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho' s' \varphi' + \frac{\partial}{\partial x} \rho' u' s' \varphi' = M e^{t-t_3} e^{x'-l} - G e^{l-x'} ; \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial t} \rho' u' s' \varphi' + \frac{\partial}{\partial x} \rho' u'^2 s' \varphi' + \rho' s' \varphi' \\
= -\tau_{\text{тр}} + p' \frac{\partial s' \varphi'}{\partial x'} e^{x' - l} - u' G e^{l - x'} \\
- \rho' s' \varphi' \frac{du_{\pi}}{dt};
\end{aligned} \tag{2.16}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial t} \rho' s' \varphi' E' + \frac{\partial}{\partial x} \rho' u' s' \varphi' E' + \rho' u' s' \varphi' \\
= (Q' M e^{t - t_3} - q'_{\text{T}} e^{t_3 - t} e^{x' - l} \\
- G E' + \frac{p'}{\rho'} e^{l - x'} - \rho' u' s' \varphi' \frac{du'_{\pi}}{dt});
\end{aligned} \tag{2.17}$$

$$\frac{dz'}{dt} = \frac{a' p'}{e'_b} e^{t - t_b} e^{x' - l}; \tag{2.18}$$

$$p' \frac{1}{\rho'} - \alpha = R' T'. \tag{2.19}$$

В системе уравнений (2.15) – (2.19):

- (2.15) – уравнение сохранения массы газа;
- (2.16) – уравнение импульса газа;
- (2.17) – уравнение энергии газа;
- (2.18) – уравнение для относительной толщины прореагировавшего слоя частиц;
- (2.19) – уравнение состояния газа;
- e^x – функция Хевисайда, $x < 0, e^x = 0; x' \geq 0, e^x = 1$.

При $x' < l$, система уравнений описывает течение газа в реагирующем объёме с боковым отводом газа через отверстия, а при $l \leq x \leq L$ – описывает течение газа в области II, занятой зёрнами конденсированной фазы.

Начальные условия:

$$\begin{aligned}
P' x', 0 = 1 \text{ атм}; \quad T' x', 0 = T_{\text{H}}; \quad u' x', 0 = 0; \\
z' x', 0 = 0; \quad \varphi' x', 0 = \begin{cases} 1, 0 < x' \leq l, \\ \varphi'_{\text{H}}, l \leq x' \leq L. \end{cases}
\end{aligned} \tag{2.20}$$

Граничные условия:

на границе справа:

$$u' |_{l,t} = 0; \quad u' |_{L,t} = 0.$$

На входе в реагирующий объём определяются потоки массы, импульса и энергии газа:

$$\begin{aligned} G' &= R' u' S' = 0; \\ I' &= R' u'^2 + p' S = 0; \\ \varepsilon &= u' R' E' + p' S = 0. \end{aligned} \quad (2.21)$$

Расчёт постепенного зажигания слоёв зёрен пороха производится на основе локальной твердофазной модели зажигания [2].

$$c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + Q \kappa'_0 e^{\frac{-E}{RT_2}}. \quad (2.22)$$

Краевые условия:

$$\begin{aligned} \lambda_2 \frac{\partial T_2(x', 0, t)}{\partial y} &= \alpha_T (T_{\Pi} - T_{\Gamma}); \\ \frac{\partial T_2(x', \infty, t)}{\partial y} &= 0; \\ T_2(x', y, 0) &= T_{\Pi}. \end{aligned} \quad (2.23)$$

Процесс горения частицы на самом первом слое стоит считать начавшимся, начиная с момента, когда температура поверхности этого слоя в текущий момент времени превысит критическую температуру T_z .

Система уравнений (2.15) – (2.21) решается совместно с задачей зажигания (2.22) – (2.23). Задача зажигания решается в каждой точке расчётной области, что позволяет рассчитать процесс постепенного зажигания первого слоя частиц пороха в области II. Значения величин давления, температуры, скорости, относительной толщины прореагировавшего слоя частиц на момент времени t_1 , когда только произошло зажигание начального слоя частицы пороха, используются как начальные условия в системе уравнений (2.2) – (2.8) (где в качестве начальных условий используются (2.10)).

2.4 Разностная схема

Расчётная ячейка, расположенная близко к левой границе поршня, рассчитывается согласно методу С.К. Годунова, применяющегося в случае раздвигающихся границ ячейки. В момент времени, когда размер последней расчётной ячейки становится равен величине большей, чем $2h$ (где h - величина расчётной ячейки), ячейка разделяется следующим образом: выделяется целое число ячеек h и одна ячейка h_N , расположенная рядом с подвижной границей, размер которой будет удовлетворять условию $h \leq h_N < 2h$.

Расчётные области покрываются разностной сеткой с шагами h, h'_1, h_{p_0} соответственно. Исходя из начальных условий, определённых в уравнении (2.10) для уравнений (2.2) – (2.8), в области II совместно решается система уравнений (2.2) – (2.8) для области I (при $N = \emptyset$). После инициирования всех частиц заряда твёрдой фазы в области II производится вычисление значений давления, температуры, скорости газа, относительной толщины прореагировавшего слоя частиц и пористости. Полученные значения будут подставлены в уравнение (2.10), таким образом став начальными условиями для использования в уравнениях (2.2) – (2.8) при $N = 1$. После этого совместно решаются системы уравнений (2.2) – (2.8) при $N = \emptyset$ и при $N = 1$. Величина шага в области II в таком случае выбирается таким образом, чтобы $h' \approx h$.

Разностные формулы для уравнений (2.2) – (2.6) и (2.15) – (2.17) записываются в виде:

$$A_i^{n+1} = A_i^n - B_{i+\frac{1}{2}} - B_{i-\frac{1}{2}} \frac{\tau}{h} + F_i \tau, \quad (2.24)$$

где

$$A_i = \begin{matrix} \rho s \varphi \\ \rho s \varphi u \\ \rho s \varphi E \\ \rho_2 s (1 - \varphi) \\ \rho_2 s (1 - \varphi) \omega \end{matrix} ; \quad (2.25)$$

$$B_{i+\frac{1}{2}} = \frac{R_L s_i \varphi_i u_L}{s_i \varphi_i (R_L u_L^2 + p_L)} R_L p_L \frac{1}{R_L} - \alpha \frac{1}{\kappa - 1} + R_L \frac{u_L^2}{2} + p_L ;$$

$$\frac{R_2 W_2 s_{i+\frac{1}{2}}}{(R_2 W_2^2 s)_{i+\frac{1}{2}}}$$

$$B_{i-\frac{1}{2}} = \frac{R_P s_i \varphi_i u_P}{s_i \varphi_i (R_P u_P^2 + p_P)} R_P p_P \frac{1}{R_P} - \alpha \frac{1}{\kappa - 1} + R_P \frac{u_P^2}{2} + p_P ,$$

$$\frac{R_2 W_2 s_{i-\frac{1}{2}}}{(R_2 W_2^2 s)_{i-\frac{1}{2}}}$$

где

τ – величина шага по времени;

F_i – столбец правых частей уравнений (2.2) – (2.6) и (2.15) – (2.17);

$p_L, p_P, u_L, u_P, R_L, R_P$ – параметры газа справа и слева на скачке сечения после распада произвольного разрыва параметров газа на скачке сечения;

R_2, W_2 – параметры к-фазы после распада произвольного разрыва для среды частиц.

Для уравнений (2.15) – (2.17) в выражениях для A и B отсутствуют две последние строки.

Уравнение (2.7) в разностном виде записывается следующим образом:

$$z_i^{n+1} = z_i^n - \frac{\tau}{2h} \left(\omega_i^n + \omega_i^n z_i^n - z_{i-1}^n + \omega_i^n - \omega_i^n z_{i+1}^n - z_i^n \right) + F_{z_i}^n \tau. \quad (2.26)$$

После определения A_i^{n+1} определяются параметры течения в ячейке на новом временном слое:

$$\varphi_i^{n+1} = 1 - \frac{\rho_2 s \frac{1 - \varphi_i^{n+1}}{\rho_2 s_i}}{\rho_2 s_i}; \quad (2.27)$$

$$\rho_i^{n+1} = \frac{\rho s \varphi_i^{n+1}}{s_i \varphi_i^{n+1}};$$

$$\begin{aligned}
u_i^{n+1} &= \frac{\rho s \varphi u_i^{n+1}}{\rho_i^{n+1} s_i \varphi_i^{n+1}}; \\
E_i^{n+1} &= \frac{\rho E s \varphi_i^{n+1}}{\rho_i^{n+1} s_i \varphi_i^{n+1}}; \\
p_i^{n+1} &= \frac{E_i^{n+1} - \frac{u_i^{n+1}}{2} \kappa - 1}{\frac{1}{\rho_i^{n+1}} - \alpha}; \\
\omega_i^{n+1} &= \frac{(\rho_2 \omega s (1 - \varphi))_i^{n+1}}{(\rho_2 s (1 - \varphi))_i^{n+1}}.
\end{aligned}$$

Для уравнений (2.12) – (2.13) разностные формулы записываются в виде:

$$\begin{aligned}
u_{\Pi}^{n+1} &= u_{\Pi}^n + \frac{s}{Q} p_i \tau, \quad t \leq t_2; \\
u'_s &= 0
\end{aligned} \tag{2.28}$$

$$\begin{aligned}
u_{\Pi}^{n+1} &= u_{\Pi}^n + \frac{s}{q_{\Pi}} (p_1 - p_2) \tau \\
u'_s &= u'_s{}^n + \frac{s}{q_s} p_3 \tau - (u_{\Pi}^{n+1} - u_{\Pi}^n), \quad t > t_2.
\end{aligned} \tag{2.29}$$

Задача инициирования химической реакции на поверхности частиц (2.22) – (2.23) решалась по неявной разностной схеме на неравномерной сетке, сгущающейся к поверхности частицы, методом прогонки.

Разностные формулы записываются в виде:

$$\frac{T_{ji}^{n+1} - T_{ji}^n}{\tau} = \kappa_2 \frac{\frac{T_{ji+1}^{n+1} - T_{ji}^{n+1}}{h_i} - \frac{T_{ji}^{n+1} - T_{ji+1}^{n+1}}{h_{i-1}}}{\frac{h_i + h_{i-1}}{2}} + \frac{Q_z}{c_2 p_2} e^{\frac{-E}{R T_{ji}^n}}. \tag{2.30}$$

Граничные условия (2.23) аппроксимировались со вторым порядком точности по координате.

Величина шага по времени определяется из условий устойчивости Куранта-Фридрихса-Леви и устойчивости по правым частям для уравнений (2.3) (при $N = \emptyset$ и при $N = 1$) и (2.16). Для счёта шага задачи по времени выбирался максимальный шаг по времени, удовлетворяющий всем этим условиям устойчивости.

2.5 Расчёт шага

Геометрия канала задаётся таблично: задаются координаты оснований цилиндрических и конических частей канала, отсчитываемые от левой границы канала ($x = \emptyset$) и соответствующие диаметры основания этих частей.

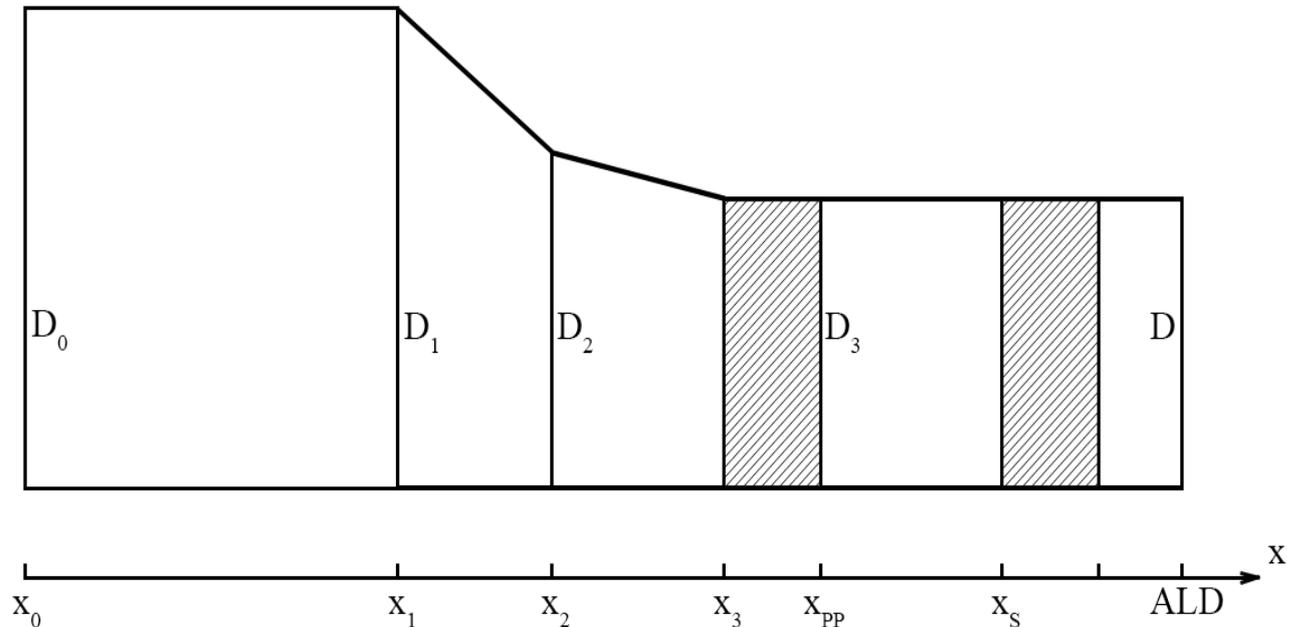


Рисунок 2.3 – Схема расчётных областей с координатами

На Рисунок 2.3 представлены задаваемые координаты и диаметры расчётной области. Все исходные данные задаются в системе единиц дециметр-килограмм-секунда. В программе предусмотрена распечатка всех исходных данных для визуального контроля введённых данных с соответствующими комментариями и подписью размерности, в которой следует вводить исходные данные.

Расчёт задачи проводится для уравнений, записанных в безразмерной форме. В качестве масштабов приняты следующие величины:

- масштаб плотности R_* - объёмная плотность вещества в области I;
- масштаб давления P_* - максимальное давление в постоянном объёме после прохождения всей реакции при плотности R_* ;

- масштаб скорости $U_* = \frac{\overline{P_*}}{R_*}$;
- масштаб площади $S_* = \frac{\pi D^2}{4}$;
- масштаб длины L_* - расстояние между левой границей канала и дном первого поршня.

Счёт шага задачи по времени складывается из следующей последовательности действий:

- определяется из условий устойчивости величина по времени;
- проводится расчёт параметров течения среды во внутренних ячейках расчётной области I, (2.24) – (2.27);
- проводится расчёт движения первого поршня в соответствии с (2.28) – (2.29) в зависимости от величины t ;
- проводится расчёт параметров течения среды в ячейках, прилегающих к подвижной правой границе расчётной области I;
- если вскрылось входное отверстие в регулирующий объём, проводится расчёт параметров течения газа в регулирующем объёме, (2.15) – (2.19);
- если вскрылись выходные отверстия регулирующего объёма, проводится расчёт параметров течения газа в области II с учётом постепенного инициирования химической реакции на поверхности частиц к-фазы (2.15) – (2.19), (2.22) – (2.23);
- если произошло инициирование химической реакции на поверхности всех частиц к-фазы, то выполняются вместо двух предыдущих пунктов три следующих;
- проводится расчёт параметров течения среды во внутренних ячейках расчётной области II, (2.24) – (2.27);
- проводится расчёт движения второго поршня в соответствии с (2.28) или (2.29) в зависимости от величины времени t ;

- проводится расчёт параметров течения среды в ячейке, прилегающей к подвижной границе расчётной области II.

Таким образом получается решение на следующем временном слое через интервал времени τ . Циклическое повторение счёта шага по времени в соответствии с вышеописанной последовательностью действий даёт информацию о нестационарном развитии процесса во времени.

Глава 3 Математическая модель схемы с выдвигающимся зарядом

3.1 Модификация эстафетной схемы

Преимущества использования эстафетной схемы были разобраны в 0, наряду с описанием математической модели рассмотренной схемы. В процессе исследования газодинамических процессов, протекающих во время работы эстафетной схемы, была рассмотрена возможность модификации данной схемы с получением дополнительного прироста в выходной скорости снаряда.

На Рисунок 2.2, отображающем расчётную схему установки с присоединённым зарядом, можно заметить, что область II, отделённая от области I и находящегося в ней заряда, с помощью поршня, когда как остальная часть области II не имеет других границ с областью I. Форма ствола позволяет совершить перенос области II вглубь области I, что позволит уменьшить размер полной сборки и таким образом позволить снаряду пройти большее расстояние по ствольной области, пока пороховые газы имеют непосредственное влияние на ускорение снаряда.

Схему, получившуюся в процессе модификации, было принято называть схемой с выдвигающимся зарядом. Её графическое представление находится на рисунке Рисунок 3.1

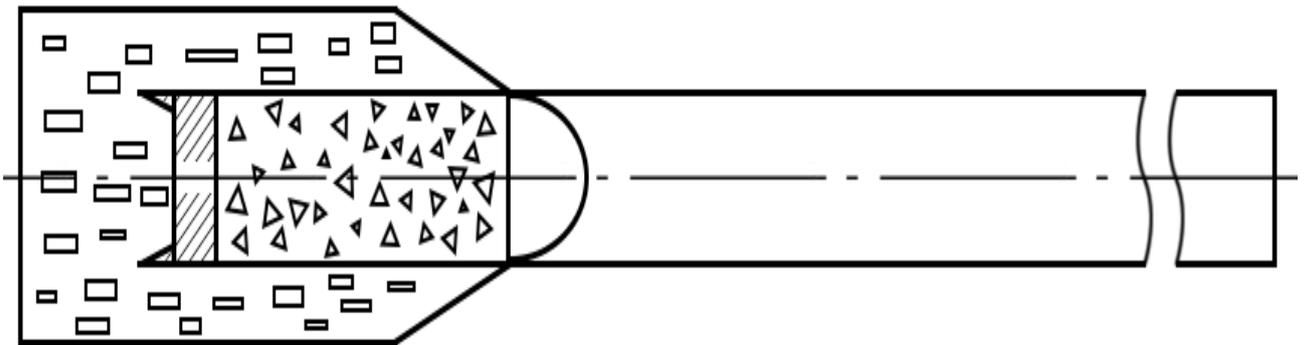


Рисунок 3.1 – Графическое представление схемы с выдвигающимся зарядом.

В области, содержащей первый заряд, содержится область цилиндрической формы, полностью закрытая от первоначального обмена сред с

областью первого заряда. Дополнительная область также имеет дополнительный заряд, который будет зажжён с задержкой относительно зажигания основного заряда. Действие пороховых газов на цилиндр будет работать относительно по тому же принципу, что и в эстафетной схеме на поршень, выталкивая сборку цилиндра и снаряда в дульное пространство, где в определённый момент времени будет совершено зажигание дополнительного заряда, осуществляя принцип, схожий с тем, который был использован в эстафетной схеме.

Стоит заметить компактность сборки относительно сборки эстафетной схемы метания. Цилиндрическая область помещается непосредственно в область основного заряда и, исходя из расположения, оказывается окружена частицами пороха.

3.2 Описание схемы с выдвигающимся зарядом

Численный анализ работы эстафетной схемы показал, что возможна реализация подгона метаемого элемента без существенного разгона поршня контейнера. В этом случае необходимо обеспечивать не такую большую задержку зажигания блока с иницирующим веществом, как в случае с принятой схемой эстафетного выстрела. Процесс работы системы схемы выстрела с выдвигающимся зарядом основан на том, что оперативно компенсируется разряжение или не очень быстрый рост давления за подвижной сборкой – поршень + заряд контейнера + метаемый элемент. За счёт этого на ускоренно движущемся метаемом элементе возникает повторный подъём давления, т.е. реализуется двугорбая кривая давления на метаемом элементе.

В начальный момент времени воспламеняется основной заряд, расположенный в первой расчетной области. Сборка – поршень + заряд контейнера + метаемый элемент – полностью и нераздельно приходит в движение. До момента воспламенения заряда контейнера расчет проводится в области основного заряда. Из начального заснарядного объёма вычитается объём выдвигающейся области, содержащей поршень + заряд контейнера + метаемый элемент. В отличие от классического выстрела поршень при

движении в направлении дульного среза занимает начальное место расположения метаемого элемента через некоторое время. К этому моменту времени его скорость становится достаточно высокой для того, чтобы участвовать в перераспределении энергии контейнерного заряда.

С этого момента времени, равного времени задержки зажигания схемы с выдвигающимся зарядом, начинается горение дополнительного или контейнерного заряда и в область, где начинается падение давления из-за ускоренного движения элементов схемы начинает поступать рабочий пороховой газ контейнерного заряда, расположенного между движущимся поршнем и метаемым элементом.

Для проведения расчетов схемы выстрела с выдвигающимся зарядом используются индивидуальные для каждой из областей системы координат (Рисунок 3.2).

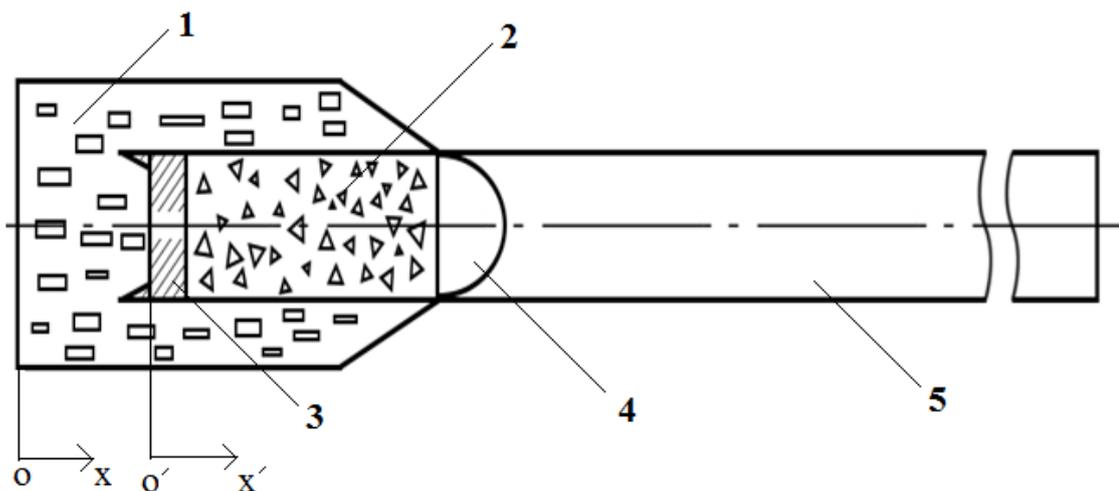


Рисунок 3.2 – Элементы схемы с выдвигающимся зарядом: 1 – область основного заряда I; 2 – область дополнительного или контейнерного заряда II; 3 – поршень; 4 – метаемый элемент; 5 – канал ствола

Численное решение по определению параметров систем схемы выстрела с выдвигающимся зарядом проводится методом распада произвольного разрыва, апробированным для использования в расчетах пороховых баллистических установок.

Общая постановка задачи дается в рамках модели гетерогенной или двухскоростной среды.

3.3 Двухскоростная среда

Решение прямой задачи внутренней баллистики для систем с ускоряемым контейнером (схема на Рисунок 3.2) проводится при следующих основных допущениях:

- в состав заряда входят зёрна пороха малого размера;
- зерна пороха имеют скорость, равную скорости окружающих пороховых газов;
- начальный слой каждого заряда пороха зажигается посредством мгновенного охвата пламенем в момент времени, соответствующий времени зажигания;
- следует пренебречь теплоотдачей и трением газа, появляющееся на стенках ствола и каморы;
- при достижении определённого уровня давления (давления форсирования) начинается движение сборки;
- процесс горения зёрен пороха происходит в соответствии с геометрическим законом горения;
- объём перетёкших газов в сборку не учитывается.

3.4 Математическая модель

Обусловленные в разделе 3.3 условия постановки задачи позволяют описать процессы, происходящие в обеих областях, области I без области выдвигающегося заряда и собственно области выдвигающегося заряда (поршень, дополнительный заряд, метаемый элемент) отделённой от области I поршнем и непроницаемой недеформируемой цилиндрической оболочкой с помощью системы уравнений (3.1 – (3.7) и дополнительных соотношений, записывающихся в различных системах координат для каждой из областей.

Процессы, которые протекают в области I, необходимо описывать с помощью системы уравнений, которая будет записана именно в инерциальной системе координат (x, t) ; аналогичная система уравнений должна описывать

процессы, которые протекают в области II, причём эта система уравнений должна быть описана в неинерциальной системе координат, которую необходимо связывать с правой границей поршня (x', t) (Рисунок 3.2).

Система уравнений, одновременно описывающая процессы, протекающие как в области I, так и в области II, в различные моменты времени, приводится ниже:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho S \varphi + \frac{\partial}{\partial x} \rho S \varphi u = M; \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho S \varphi u + \frac{\partial}{\partial x} \rho S \varphi u^2 + p S \varphi = M \omega - \tau_{\text{тр}} + p \frac{\partial \varphi S}{\partial x} - N \rho S \varphi \frac{du_{\text{II}}}{dt}; \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \rho S \varphi E + \frac{\partial}{\partial x} S \varphi u \rho E + p \\ = -p \frac{\partial (1 - \varphi) S \omega}{\partial x} - \tau_{\text{тр}} \omega + M \left(Q + \frac{u^2}{2} \right) - N \rho S \varphi u \frac{du_{\text{II}}}{dt}; \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_2 S (1 - \varphi) + \frac{\partial}{\partial x} \rho_2 S (1 - \varphi) \omega = -M; \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \rho_2 S (1 - \varphi) \omega + \frac{\partial}{\partial x} \rho_2 S (1 - \varphi) \omega^2 + (1 - \varphi) S \frac{\partial p}{\partial x} \\ = \tau_{\text{тр}} - M \omega - N \rho_2 (1 - \varphi) S \frac{du_{\text{II}}}{dt}; \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \omega \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{a_1 p}{e_b}; \quad (3.6)$$

$$p \frac{1}{\rho} - \alpha = RT; \quad (3.7)$$

$$E = \varepsilon + \frac{u^2}{2};$$

$$\varphi = 1 - n \Lambda_0 (1 - \psi z);$$

$$\psi z = \chi_1 z (1 + \lambda_1 z);$$

$$\sigma z = 1 + 2 \lambda_1 z;$$

$$M = S n S_{02} \rho_2 \sigma(z) a_1 p;$$

$$M' = S'n'S'_{02}\rho'_2\sigma z' a'_1p'e t' - t'_3 ;$$

$$\tau_{TP} = \frac{1}{2} C_x \rho u - \omega u - \omega S_n \frac{\pi d_{op}^2}{4} 1 - \psi z^{\frac{2}{3}};$$

$$C_x = \begin{cases} \frac{24}{Re} + 0.48, & 0 < Re < 3 * 10^5; \\ 0.1, & Re \geq 3 * 10^5 \end{cases} ;$$

$$Re = \frac{\rho u - \omega \varphi \overline{S_{02}}}{\mu}.$$

Система уравнений (3.1 – (3.7) при $N = 0$ описывает процессы в области I, при $N = 1$ и замене параметров и переменных на соответствующие им параметры и переменные со штрихом ' ($u \equiv u'$ и т.д.) описывает процессы в области II, происходящие уже после разделения сборки (с момента времени t_1).

В системе уравнений (3.1 – (3.7):

- (3.1) – уравнение сохранения массы газа;
- (3.2) – уравнение импульса газа;
- (3.3) – уравнение энергии газа;
- (3.4) – уравнение сохранения массы частиц пороха;
- (3.5) – уравнение импульса пороха;
- (3.6) – уравнение для относительной толщины прореагировавшего слоя частиц;
- (3.7) – уравнение состояния.

Начальные условия для области I:

$$T_{x,0} = T_G; p_{x,0} = p_\Phi; u_{x,0} = \omega_{x,0} = 0; \varphi_{x,0} = \varphi_H;$$

$$\psi_H = \frac{\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{\rho_2}}{\frac{f}{p_\Phi} + \alpha - \frac{1}{\rho_2}}; z_H = \frac{2\psi_H}{\kappa_1(1 + \sigma_H)}; \sigma_H = \frac{\lambda_1}{\kappa_1} \psi_H. \quad (3.8)$$

Начальные условия для области II:

$$\begin{aligned} T' x', t_1 &= T'_G x' ; p' x', t_1 = p' x ; u' x', t_1 = u' x' ; \omega' x', t_1 \\ &= 0; \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\varphi' x', t_1 = \varphi' x' ; z' x', t_1 = z'(x').$$

Граничные условия:

$$u \ 0, t = \omega \ 0, t = 0; u \ x_{\Pi}, t = \omega \ x_{\Pi}, t = u_{\Pi}; \quad (3.10)$$

$$u' \ 0, t = \omega' \ 0, t = 0; u' \ x'_{\Pi}, t = \omega' \ x'_{\Pi}, t = u'_{\Pi},$$

где:

x_{Π} – координата поршня;

x'_{Π} – координата метаемого элемента;

u_{Π} – скорость поршня;

u'_{Π} – скорость метаемого элемента.

Значения вышеуказанных переменных определяются интегрированием уравнений движения полной сборки и движения поршня и элемента после разделения сборки.

$$\begin{aligned} m_{сб} \frac{du_{\Pi}}{dt} &= p_1 S \\ q'_{\Pi} \frac{du'_{\Pi}}{dt} &= 0 \end{aligned} \quad , t \leq t_2; \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} q_{\Pi} \frac{du_{\Pi}}{dt} &= (p_1 - p_2) S \\ q'_{\Pi} \frac{du'_{\Pi}}{dt} &= p_3 S - q'_{\Pi} \frac{du_{\Pi}}{dt} \end{aligned} \quad , t > t_2, \quad (3.12)$$

где:

p_1 – давление на поршень слева (из области I);

p_2 – давление на поршень справа (из области II);

p_3 – давление на метаемый элемент слева (из области I);

$m_{сб}$ – масса полной сборки;

q_{Π} – масса поршня;

q'_{Π} – масса метаемого элемента.

В момент времени t_2 , когда ускорение метаемого элемента станет больше ускорением поршня под действием давления, происходит разделение сборки по выполнению условия:

$$p_3 > \frac{q'_\Pi}{q_\Pi} p_1 - p_2 . \quad (3.13)$$

Обозначения:

t – время;

x – координата;

u – скорость газа;

ω – скорость конденсированной фазы;

p – давление;

ρ – плотность газа;

ρ_2 – плотность вещества пороха;

T – температура;

φ – пористость;

E, ε – полная и внутренняя энергия единицы объёма газа;

S – площадь поперечного сечения канала ствола;

z – относительная толщина сгоревшего свода;

M – скорость массоприхода от горения пороха;

$\tau_{\text{ТР}}$ – сила взаимодействия между твёрдой и газообразной фазами;

$\frac{du_\Pi}{dt}$ – ускорение поршня;

Q – тепловой эффект горения пороха;

R – универсальная газовая постоянная;

α – коволюм;

e_B – толщина горящего свода зерна пороха;

a_1, v – коэффициенты в законе скорости горения;

n – концентрация вещества в частице;

Λ_0 – начальный объём частицы пороха;

$\psi(z)$ – относительный сгоревший объём частицы пороха;

χ_1, λ_1 – коэффициенты формы частиц пороха;

S_{02} – начальная площадь частиц пороха;

$\sigma(z)$ – относительная горящая поверхность частицы пороха;

C_x – коэффициент сопротивления;

d_{op} – диаметр шара, эквивалентного по объёму частице пороха;

Re – число Рейнольдса;

μ – вязкость газа;

t_3 – момент зажигания частиц пороха присоединённого заряда;

$e(t' - t'_3)$ – функция Хевисайда.

Данная система уравнений (3.1 – (3.7), с установленными соотношениями, начальными условиями (3.8) – (3.9), граничными условиями (3.10) – (3.12) и условием разделения сборки (3.13), решается в каждой точке расчётных областей, определяя параметры процесса работы схемы с выдвигающимся зарядом.

Численное решение системы уравнений (3.1 – (3.7) совершается с использованием разностного метода численного расчёта уравнений распада произвольного разрыва, также известный как метод Годунова [16]. Для такого метода ведётся решение задачи распада произвольного разрыва на скачке сечения, что позволяет определить на обеих границах расчётных ячеек параметры газа, такие как потоки газа, импульса и энергии [17]. С помощью решения задачи о распаде произвольного разрыва параметров газа на непроницаемой поверхности определяются давления p_1, p_2, p_3 , необходимые для решения уравнений (3.11), (3.12), где решение совершается с использованием метода Эйлера.

Глава 4 Программная реализация модели

4.1 Анализ технических средств реализации

Использование мощностей электронно-вычислительной машины для счёта модели кажется уже обыденностью, так как компьютеры окружают нас даже в повседневной жизни, размер полнофункциональных вычислительных машин за чуть больше полвека уменьшился с целой комнаты до размеров кредитной карточки, при этом производительность увеличилась в миллионы раз.

Раньше вычислительные эксперименты проводили путем длительного анализа и проведения кропотливой аналитической работы. Отличительной особенностью такого подхода была прозрачность всех вычислительных операций, которые совершал исследователь. Именно таким образом при помощи постановки мысленного эксперимента и его формульной реализации когда-то Исаак Ньютон смог вычислить массу Луны. Однако у такого подхода есть основанная негативная черта: крайняя длительность расчетов и вероятность допущения ошибки при повторном расчете с другими данными. Современный мир часто требует проведения тысяч экспериментов в кратчайшие сроки, без использования натуральных стендов или упрощенных натуральных испытаний.

Это стало возможно с появлением полноценных ЭВМ, способных взять на себя расчетную часть. Математическая модель, составляемая инженером, физиком или иным специалистом ложилась в основу вычислительного процесса. В зависимости от постановки задачи можно было добиться различных результатов. Стало возможным проводить вычислительные эксперименты над виртуальными объектами с различными параметрами, условиями и применяемыми методами. Это позволило не только экономить деньги на реализации дорогостоящих проектов, которые часто имели бы непредсказуемые результаты, но и обезопасило само исследование. В дальнейшем, после тщательного анализа расчетов математической модели уже можно прибегнуть к реализации опытных образцов и натуральных экспериментов.

Аналогично физическому эксперименту, который можно воспроизвести в лабораторных условиях или на специализированном стенде, виртуальный эксперимент может реализовать в своей концепции основные физические принципы, использовать уже известные и не требующие доказательств формулы, а, следовательно, выдавать достоверные и качественные результаты. Конечно, качество результатов во многом зависит от качества созданной математической модели. Физические процессы могут быть описаны на ЭВМ, которое само по себе уже является физическим устройством, основанном и функционирующем на законах физики и электротехники. Используя дифференциальные уравнения, численные методы, статистические исследования – можно построить полноценную и достоверную математическую модель, которая будет не только динамически правдоподобной, но и позволит проводить множество имитационных экспериментов над объектом исследования.

Сам по себе подход имеет множество традиционных областей своего применения. Особенно важно численное моделирование в тех областях, где не совсем ясна физика процесса или её крайне сложно и длительно описывать. Часто это видно на примерах процессов с множеством неизвестных, но детерминированных начальных данных. Такие физические процессы удается обчислять при помощи статистического и численного методов, которые позволяют создать целостную картину без значительной потери качества реализации эксперимента. Особенно актуально применение численного метода моделирования в задачах, связанных с механикой твердых тел, механикой жидкостей, газов, плазмы и т.д.

Не редки ситуации, когда исследователь вынужден сталкиваться со сложными режимами воздушных потоков (движений газов), возникающими в условиях до-, транс-, сверх- и гиперзвуковых режимах. Задачи с подобными составляющими выдвигаются в современной практике исследования аэродинамики летательных аппаратов, их поведения в различных аэродинамических и летных условиях. Тут же можно встретить и исследование

температурных воздействий, которые способны вести к эффектам диссоциации и ионизации в воздушных потоках. В некоторых случаях, ведущих к свечению газа и формированию плазмы. Вот именно такие эффекты крайне трудно качественно воспроизводить лабораторных условиях. Здесь помогает математическое моделирование, которое может позволить использовать сложную физику с выполнением критерия подобия (например, равенства чисел Маха и Рейнольдса).

В решаемых задачах данной диссертации так же важно решение равенства абсолютных давлений и абсолютных температур, что осуществимо только при помощи соответствия размеров модели с размером исследуемого явления или эффекта. Это тоже можно воплотить при помощи

компьютерного эксперимента с использованием Математической модели.

Как было упомянуто выше, значимой проблемой натурных экспериментов и «вычислений на бумаге» является большой временной интервал для их реализации. Многие физические эксперименты просто не целесообразно проводить многократно на стендах, так как затраты времени превышают допустимые нормы. Некоторые эксперименты, в частности и артиллерийские исследования, часто зависят от качества стенда для исследований. Ввиду длительности и характеров экспериментирования такой стенд подвержен негативным факторам «усталости» конструкций и нарушению целостности различных компонентов с течением времени и множеством экспериментов. Численное компьютерное моделирование предоставляет иной подход к временным затратам на проведение экспериментов. Оно не зависит от целостности конструкций, вспомогательных расходных материалов и иных условий, которые неизбежно пришлось бы постоянно корректировать в ходе «живых экспериментов».

При этом, виртуальный вычислительный эксперимент можно поставить на паузу или прервать в любой момент его проведения, скорректировать и перезапустить с иными условиями с какого-то конкретного шага. Вычислительный эксперимент позволяет рассматривать протекающие

физические процессы с различных сторон подхода, параметров и изучать их промежуточные результаты.

Задачи, связанные с решением проблем использования газодинамического подхода, обладают чрезвычайно сложной математической постановкой, которые могут быть решены с помощью использования численного моделирования. При данном подходе появляются новые возможности в постановке исследуемых вопросов, так как теоремы, интересующие исследователя, могут быть не сформулированы в достаточном объёме и однозначности решения, что безусловно раскрывает необходимость использования подхода численного моделирования.

Если принимать во внимание механику сплошных сред, то при решении задач, связанных с областью применения этой механики, необходимо иметь дело с дифференциальными уравнениями в частных производных, иногда описанных в интегральной форме. Постановка таких задач чаще всего описывает наличие подвижных границ, которые могут быть установлены непосредственно в постановке и могут меняться в процессе вычисления, что тоже необходимо отразить в отдельном математическом описании.

В данном исследовании рассматривается задача, связанная с газодинамическими процессами внутренней баллистики, возникающих в процессе горения порохового заряда и под действием которых осуществляется движение метаемого элемента по каналу ствола артиллерийского орудия. При постановке задачи необходимо учитывать большое количество переменных, вследствие чего аналитическое решение такой задачи видится трудновыполнимым, поэтому для получения решения данной задачи практически единственным средством будет являться численное моделирование.

Несмотря на вышеупомянутые преимущества использования численного моделирования, ни в коем случае нельзя отменить роль физического эксперимента. Численная модель применима только в рамках математической модели, которая была принята за основу, что является существенным

недостатком численного моделирования, в то время как адекватность математической модели и оценка её применения могут быть получены по результатам проведения физического эксперимента. Однако, именно с помощью численной модели возможно получение объяснения физического эксперимента, поэтому наиболее целесообразным будет являться сочетание всех подходов, как физического, так и численного.

Для каждого из подходов необходима подготовка к построению модели, заключающаяся в определённой последовательности шагов.

Для каждого из подходов проводится анализ объекта исследования, создаётся физическая модель и математическое описание (подбирается наиболее подходящая математическая модель).

Для физического эксперимента выбирается схема, основанная на результатах анализа объекта исследования, создаётся установка для проведения эксперимента. Отдельное внимание в такой установке будет отдаваться элементам конструкции, которые отвечают за основные процессы, которые необходимо рассмотреть в ходе физического эксперимента. Полученная установка подлежит отладке и калибровке.

Для численного моделирования характерна другая последовательность действий. Система дифференциальных уравнений решается с помощью метода численного интегрирования (или дифференцирования в случае исходной системы интегральных уравнений), по которой будет построена разностная схема решения этой системы. Данная разностная схема будет воплощена в вычислительном алгоритме, адаптированном для возможностей определённой ЭВМ. Полученное программное средство подлежит отладке, как в общем, так и каждый отдельный модель в частности.

В результате проведённых шагов, при использовании того или иного подхода, получается готовое средство для проведения исследования. На готовом средстве уже возможно проведение эксперимента, как на физической установке, так и в программном средстве, после чего полученные результаты можно использовать в ходе дополнительной отладки или внесении

корректировок в конструкцию экспериментального стенда, а также для внесения изменений в саму исходную математическую модель.

Исходя из взаимодействия этих двух подходов, они смогут как дополнять себя с помощью внесения уточнений, определяемых из результатов эксперимента, либо опровергать друг друга, в случае полученной ошибки в одном из них, что позволяет найти непосредственную ошибку, а не проводить все вычисления на изначально неверной модели.

Доступность ЭВМ и их постоянно увеличивающиеся мощности предоставляют исследователям всё больше возможностей в использовании этих мощностей в расчётах численной модели. Процессы и явления могут быть рассмотрены ещё глубже и с использованием различных методов и подходов, могут быть рассчитаны задачи с огромным количеством переменных, причём не затрачивая на расчёты большое количество времени (исходя из алгоритмов, которые создаются в ходе процесса моделирования). Использование численного моделирования для решения задач одной области позволяет получить результаты, которые могут быть использованы для решения задач других областей, что повышает эффективность решения последующих задач. Такое преимущество численного моделирования повышает интерес исследователей, что в свою очередь приводит к использованию этого подхода при решении всё большего количества задач абсолютно разных областей.

Ресурсы ЭВМ всё же не являются бесконечными, не для всех задач этих ресурсов достаточно, поэтому перед исследователем должна стоять задача создания ресурсоэффективной программной реализации. Исходя из сложности структуры объекта исследования, его математического описания, целей моделирования или размеров входных данных, необходимо выбирать характер модели, границы моделирования, требуемую точность, возможность разбора на компоненты, и описание процессов, происходящих в каждом из них.

Используя ресурсы персонального компьютера и доступность инструментов разработки, имеется возможность задействовать вычислительные

мощности процессора для расчёта работы математических моделей разной степени сложности.

Полученная в 0 математическая модель уже включает в себя описание разностной схемы, которая несомненно может быть использована в программной реализации данной модели, с потенциальной возможностью использования ресурсов дополнительных чипов по типу графического видеочипа, находящегося на видеокарте.

Первая версия программного обеспечения была реализована с помощью языка программирования C, используя диалект C99 для упрощения дальнейшего переноса программного кода с использованием распараллеленных вычислений.

4.2 Распараллеливание с помощью OpenCL

В качестве языка программирования был выбран язык C, в частности его диалект C90 для возможности дальнейшей модификации программы и портирования на OpenCL C для вычисления с помощью графического процессора.

Для использования возможностей пакета OpenCL необходима подготовка системы к выполнению программ, написанных с использованием этого пакета библиотек, конфигурация среды выполнения и среды разработки для подключения и использования библиотек в ходе разработки. OpenCL предоставляет библиотеки для использования в том числе и через производителей чипов, предоставляющие программисту возможность использования с помощью OpenCL, причём специально адаптированных для того или иного устройства (на настоящий момент производители графических процессоров, доступных широкому кругу пользователей и уже включенных в популярные сборки персональных компьютеров, к примеру, Nvidia, AMD и Intel предоставляют драйверы для своих устройств вместе с библиотеками OpenCL с документацией и примерами).

В рамках данного исследования была использована библиотека OpenCL, предоставленная компанией AMD вместе с пакетом драйверов для видеочипа архитектуры Polaris, AMD Radeon RX 470.

Программа получает на вход список параметров, необходимых для расчёта модели. Параметры позволяют программе определить начальные и краевые значения для необходимых переменных, в соответствии с условиями, поставленными в 0.

Для более высокой точности расчётов переменные, описанные в программе, используют тип *double* (кроме целочисленных переменных, типа порядковых номеров при проходе в цикле и количества ячеек в области I или II, для них используется тип *int*), что позволяет использовать двойную точность для каждой из переменной. Причём каждая переменная может хранить число с плавающей запятой и будет занимать в памяти 8 байт.

Написание программы происходило на компьютере, поддерживающем 64-разрядные числа с плавающей точкой, однако не для всех типов процессоров справедливо такое распределение памяти. К примеру, программный пакет OpenCL позволяет использовать графический процессор для параллельных вычислений. Для этого видеокарта должна поддерживать определённую версию OpenCL и иметь специальные флаги, связанные с этим программным пакетом. Для карт производителя AMD свойственно иметь определённый набор флагов, в который входит поддержка чисел с двойной точностью, но это не является обязательным условием, поэтому реализация программы, описанной в данном исследовании, на более устаревшие видеокарты AMD потребует модификации всех типов переменных и потере точности при переносе *double* на *long*.

На момент времени проведения данного исследования все современные видеокарты AMD и Nvidia поддерживают числа двойной точности с плавающей точкой.

В начале работы программы после ввода исходных данных проводится вывод всех входных данных задачи с соответствующими обозначениями для проверки правильности ввода данных в задаче.

Через заданный шаг времени выводится информация о состоянии системы в текущий момент времени. Среди информации содержатся значения скорости газа, поршня, метаемого элемента, сборки, давлений в каждой из областей, пористости частицы пороха (1, если конденсированная фаза завершилась и весь порох был сожжён) в непосредственный момент времени.

Поскольку обе расчётные области покрываются разностными сетками с определёнными для каждой из областей шагами, программа пошагово разбирает процессы, проходящие в областях I и II, разделяя их на ячейки определённого размера, рассчитывая значения на границах ячеек.

После вскрытия входного отверстия в регулирующий объём, к выводимой информации добавляется печать распределений параметров течения в регулирующем объёме и области II на этапе расчёта инициирования. Их печать происходит до момента инициирования реакции на всех частицах, после чего их печать прекращается.

Расчёты каждой ячейки происходят таким образом, что появляется возможность потенциального модифицирования кода программы для использования параллельных вычислений с помощью дополнительных программных пакетов, таких как OpenCL.

Особенность пакета OpenCL заключается в том, что разные видеокарты поддерживают разные версии данного пакета, самая распространённая на данный момент версия 1.2. Консорциумом Khronos были подготовлены стандарты OpenCL 2.1 и 2.2, которые в скором времени будут задействованы в новейших моделях основных игроков рынка видеокарт.

Стоит отметить введение в OpenCL 2.0 языка OpenCL C++, позволяющий использовать модифицированный диалект C++11 для программирования ядра, которое будет рассчитываться на графическом процессоре. Как и предоставленный в ранних версиях диалект C90 под названием OpenCL C, реализованный язык программирования имеет ряд ограничений в сравнении с первоисточником, однако использование ООП на графическом процессоре

открывает новые возможности в увеличении скорости получения результатов от параллельных вычислений.

С версией OpenCL 2.1, стандартизированной в ноябре 2015-го года, стал поставляться OpenCL C++, основанный на диалекте C++14, предоставляющий возможность воспользоваться шаблонами и лямбда-выражениями внутри ядра. Из стандарта C++14 для реализации в ядре были убраны обработки исключений, распределение памяти (память всегда должна распределяться хост-системой), рекурсии и оператор *goto*.

Общая структура программы с использованием OpenCL будет выглядеть более комплексной, чем при использовании аналогичных технологий для распараллеливания с использованием видеочипа и ядер, на нём находящихся (Nvidia CUDA), поскольку OpenCL нацелена на поддержку как можно большего числа платформ и архитектур, что влечёт за собой принятие дополнительных действий, направленных на конфигурирование среды выполнения и подготовки кода к запуску на необходимом устройстве. В OpenCL такая среда называется *context*, включающая в себя *platform* (платформу), *device* (устройство) и *buffers* (буферы) памяти для этих устройств.

Схема программы с использованием OpenCL представляет из себя:

- получение информации о платформе и устройствах;
- выбор устройства и создание контекста для использования устройства;
- создание ядра из исходного кода программы, адаптированной для запуска на устройстве, сборка ядра;
- выделение памяти под буферы;
- создание очереди на запись в память устройства;
- копирование данных из хост-программы на устройство;
- назначение параметров для запуска ядра на устройстве;
- запуск ядра с заданными параметрами;
- ожидание хост-системой данных, получаемых буфером чтения;
- обработка результатов работы ядра после получения данных;

- освобождение занятых буферами участков памяти, сброс очередей на запись и чтение с устройства, отвязка устройства и контекста.

Сборка ядра производится с помощью LLVM (Low Level Virtual Machine) и происходит во время работы основной программы на хост-системе, поэтому ошибки ядра нельзя отловить на этапе компиляции хост-программы. Для этого в OpenCL API предоставляется функционал для вывода информации о компиляции ядра на печать и в файл для дальнейшего устранения возможных ошибок синтаксиса.

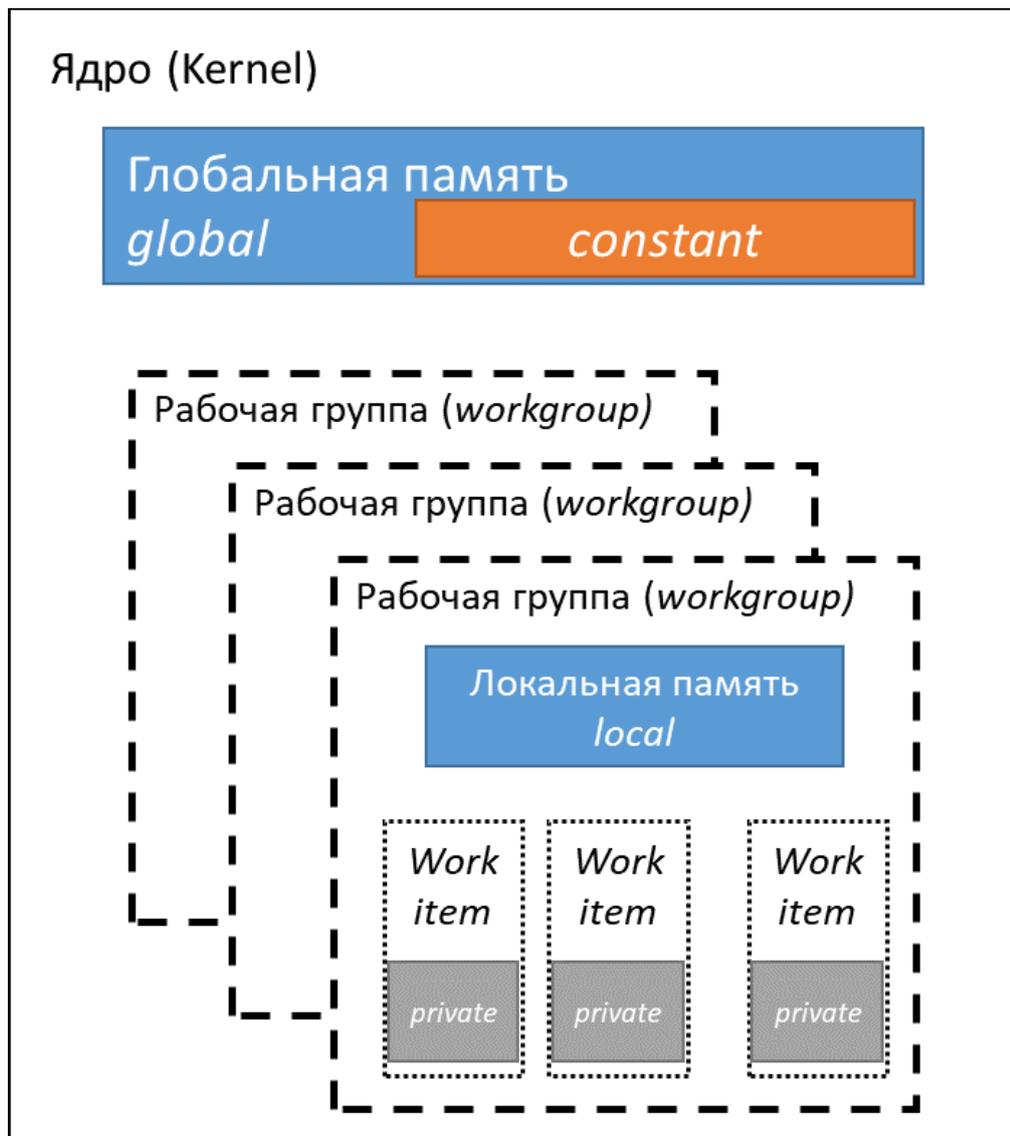


Рисунок 4.1 – Модель памяти, используемая в OpenCL

Распределение памяти между рабочими областями на графическом процессоре стоит главной задачей перед программистом при написании ядра для использования параллельных вычислений. Для каждой переменной

существует возможность находиться в одной из четырёх особых зон памяти: *local*, *private*, *global* и *constant*, как представлено на Рисунок 4.1.

private – доступна в пределах одной рабочей области;

local – доступна в пределах одной рабочей группы;

global – доступна всем группам и областям соответственно;

constant – доступна всем группам и областям, но недоступна для изменения.

Отладка ядра, написанного на OpenCL C и выполняемого на графическом процессоре, не поддаётся стандартному отладчику, так как не существует непосредственной точки входа в выполняемый на видеокарте процесс. Для таких целей используются сторонние решение, предоставляемые каждым из производителей видеокарт, доступных на рынке. Для видеокарт производителя AMD доступно программное решение под название CodeXL, выдающее информацию о производительности установленной в системе графического процессора, позволяет производить отладку запускаемого ядра на видеокарте и выдаёт статистику об использовании ресурсов видеокарты для производимых расчётов.

Вычисления в ходе данного исследования проводились на видеокарте компании AMD Radeon RX 470, использующей технологию видеочипа Polaris с поддержкой асинхронных вычислений.

4.3 Работа реализованного программного решения.

Модель, описанная в предыдущей главе, была реализована современными программными средствами и запущена на современном шестиядерном процессоре предыдущего поколения перспективной архитектуры Summit Ridge компании AMD – AMD Ryzen 5 1600X. Рабочая станция, использующая данный процессор, имеет доступ к быстрой оперативной памяти стандарта DDR4.

Входные данные предусматривают начальное количество ячеек в каждой из областей; при изменении количества ячеек, находящихся в каждой из

областей, увеличивается точность вычисления посредством последовательного прогона большего количества ячеек меньшего размера.

Увеличение начального количества ячеек увеличивает время работы программы, так как послойное вычисление требует больше времени на проведение всех операций на каждом слое. Для каждой тестируемой системы было найдено наиболее подходящее для неё количество ячеек, образованных после покрытия областей разностными сетками.

Завершение работы программы происходит на последнем выведении информации состояния системы, так как на этом временном этапе второй поршень прошёл расстояние, равное длине канала.

По окончании работы программы, файл логов, находящийся в папке с исполняемым файлом, будет содержать всю ранее выведенную информацию о каждом временном интервале, который был просчитан программой, исходя из шага по времени (рассчитывается по критерию Куранта-Фридрихса-Леви).

В конце файла логов находятся максимальные значения давлений, полученные в ходе выполнения программы.

Параллельно основному файлу с выходными данными, используемым для отладки и проверки корректной работы реализованного программного решения, программой генерируется второй файл, в котором в текстовом формате находятся непосредственные данные для каждого шага расчёта. Данные распределены на 9 столбцов, отформатированные таким образом, чтобы упростить дальнейший экспорт полученных данных в программные комплексы для построения графического отображения результатов в виде графиков. Для построения графиков может использоваться любое современное программное обеспечение, работающее с данными для графиков; в ходе данного исследования использовался программный пакет Origin 9 за авторством OriginLab, Mathcad 15 от PTC, Inc. и Microsoft Excel 2013, входящий в пакет Microsoft Office 2013.

Среди выходных данных используются:

- время, прошедшее с момента начала работы схемы (удар по капсюлю и зажигание первого слоя порохового заряда);
- скорость поршня на данный момент времени;
- скорость снаряда на данный момент времени (до момента разделения сборки скорость снаряда будет равна скорости поршня, после разделения показания будут отличаться);
- координата левой границы поршня относительно дна канала ствола;
- координата левой границы снаряда относительно дна канала ствола;
- давление пороховых газов на дно области I;
- давление пороховых газов на дно поршня в области II;
- давление пороховых газов из области I на левую границу поршня;
- давление пороховых газов из области II на левую границу снаряда.

На основе данных, полученных после расчётов реализованной программными средствами модели, был построен график скорости сборки и скоростей снаряда и поршня после разделения сборки, для системы среднего калибра.

Глава 5 Анализ способов улучшения работы системы

5.1 Анализ проведённого исследования

Полученная в ходе исследования программная реализация математической модели эстафетной схемы метания была опробована на различных системах реально существующих артиллерийских орудий и модификаций. Преимущественно производилась отработка модели на системах среднего калибра, так как в ходе исследования наибольший интерес вызывал потенциальный прирост выходной скорости снаряда именно в системах среднего калибра. По данному исследованию были опубликованы две статьи с анализом и описанием эстафетной схемы в системе среднего калибра.

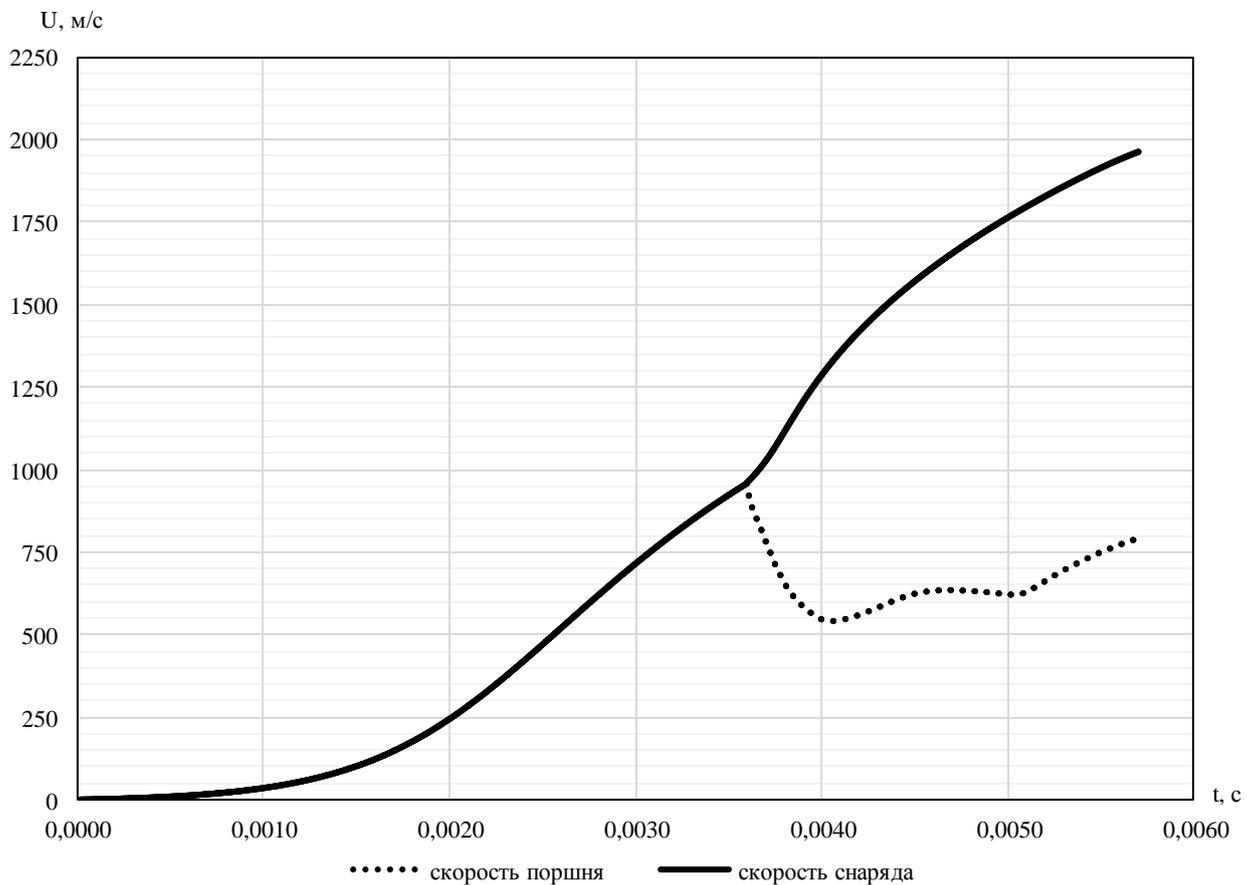


Рисунок 5.1 – График скоростей поршня и снаряда в зависимости от времени по результатам работы программы с данными системы калибра 125 мм эстафетной схемы

В качестве источников параметров артиллерийского орудия и существующих снарядов использовалась условная модификация гладкоствольной танковой пушки 2А46.

По полученному графику на **Ошибка! Источник ссылки не найден.** видно, что после зажигания присоединённого заряда в области II, сборка разделяется, метаемый элемент резко ускоряется, а поршень значительно тормозится. После произошедшего перераспределения энергии пороховых газов давление на снаряд становится больше, чем на поршне, что отражается в более эффективном подгоне метаемого элемента.

Данное поведение отличается от поведения, представляемого классической схемой метания, и предоставляет возможный выигрыш в расчётной начальной скорости метаемого элемента в размере до 15%.

График построен в зависимости от времени, поэтому можно заметить, что разделение сборки происходит довольно поздно во время выстрела. Однако, стоит отметить, что после зажигания начального слоя порохового заряда в области II происходит разделение сборки, что влечёт за собой дополнительное ускорение снаряда. Чем выше скорость снаряда, тем большее расстояние он способен проходить за единицу времени. Программа прекращает работу ровно в тот момент, когда зарегистрировано, что левая граница снаряда покидает дульный срез, поэтому наибольшее расстояние снарядом преодолевается именно после разделения сборки.

Чтобы отразить, где именно происходит разделение сборки, все следующие графики будут построены именно в зависимости от координаты.

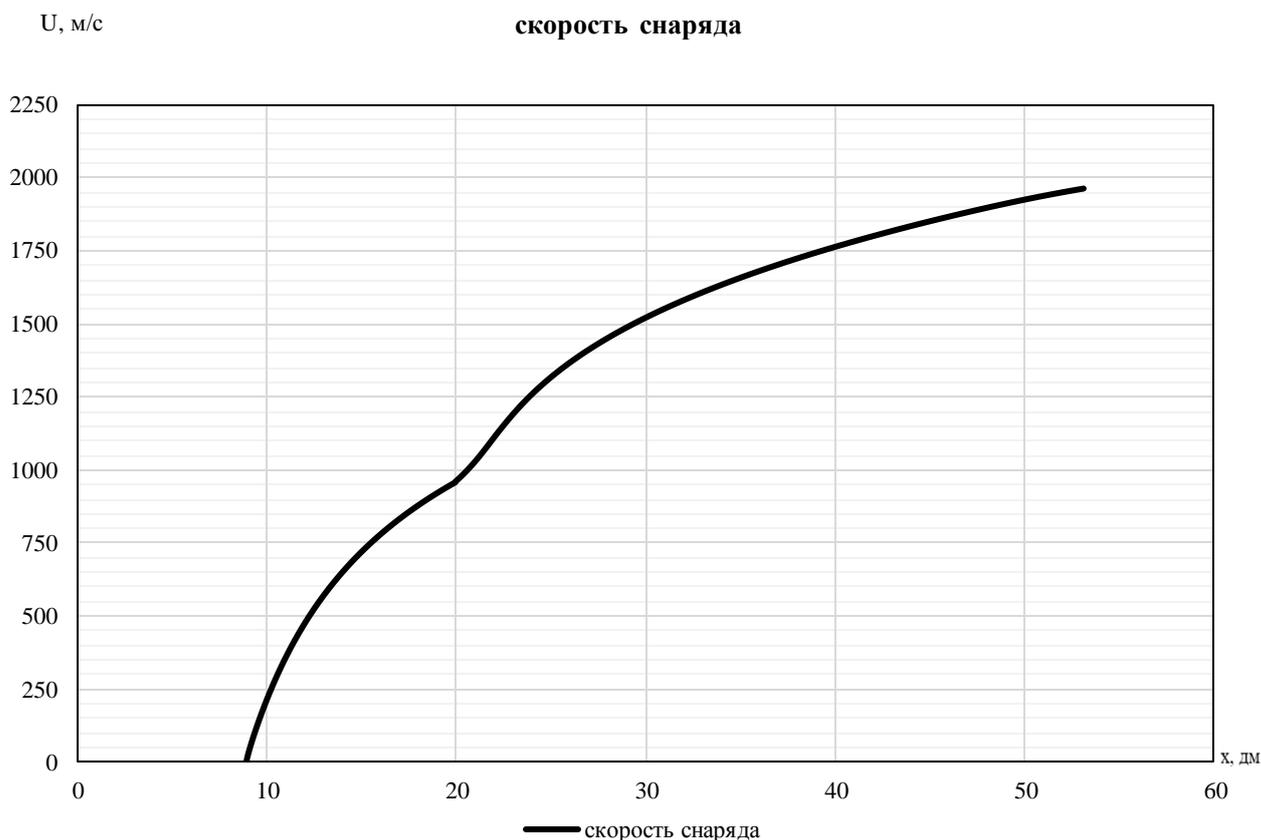


Рисунок 5.2 – График скорости снаряда в зависимости от координаты по результатам работы программы с данными системы калибра 125 мм эстафетной схемы

На Рисунок 5.2 представлен график скорости снаряда в зависимости от координаты по результатам работы программы с данными системы калибра 125 мм эстафетной схемы.

По графику видно, как кривая скорости изменяет своё направление на отметке координаты в 19,5 дм. Когда левая граница снаряда пересекает эту отметку в стволе (начиная отсчёт от казённика), происходит разделение сборки, после чего снаряд получает дополнительное ускорение, что отображено на этом графике как дополнительный изгиб кривой.

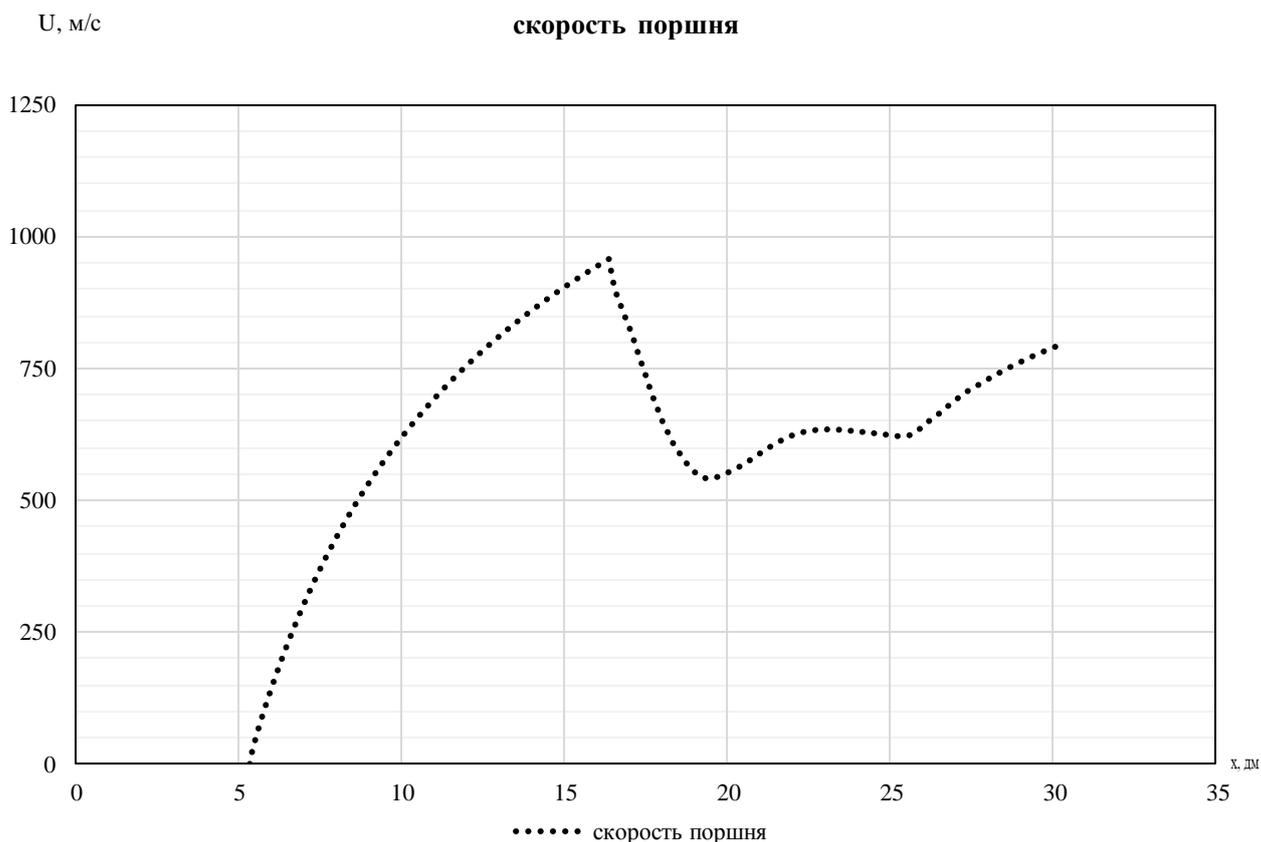


Рисунок 5.3 – График скорости поршня в зависимости от координаты по результатам работы программы с данными системы калибра 125 мм эстафетной схемы

На Рисунок 5.3 представлен график скорости поршня в зависимости от координаты по результатам работы программы с данными системы калибра 125 мм эстафетной схемы.

По графику видно, как кривая скорости изменяет своё направление на отметке координаты в 16,3 дм. Когда левая граница поршня пересекает эту отметку в стволе (начиная отсчёт от казённика), происходит разделение сборки, после чего снаряд получает дополнительное ускорение, а поршень наоборот замедляется, что отображено на этом графике как дополнительный изгиб кривой.

После того, как снаряд проходит определённое расстояние в стволе, область между поршнем и стволом расширяется настолько, что давление из области I выше, чем давление из области II, что разгоняет поршень. На графике это можно заметить на отметке в 19 дм.

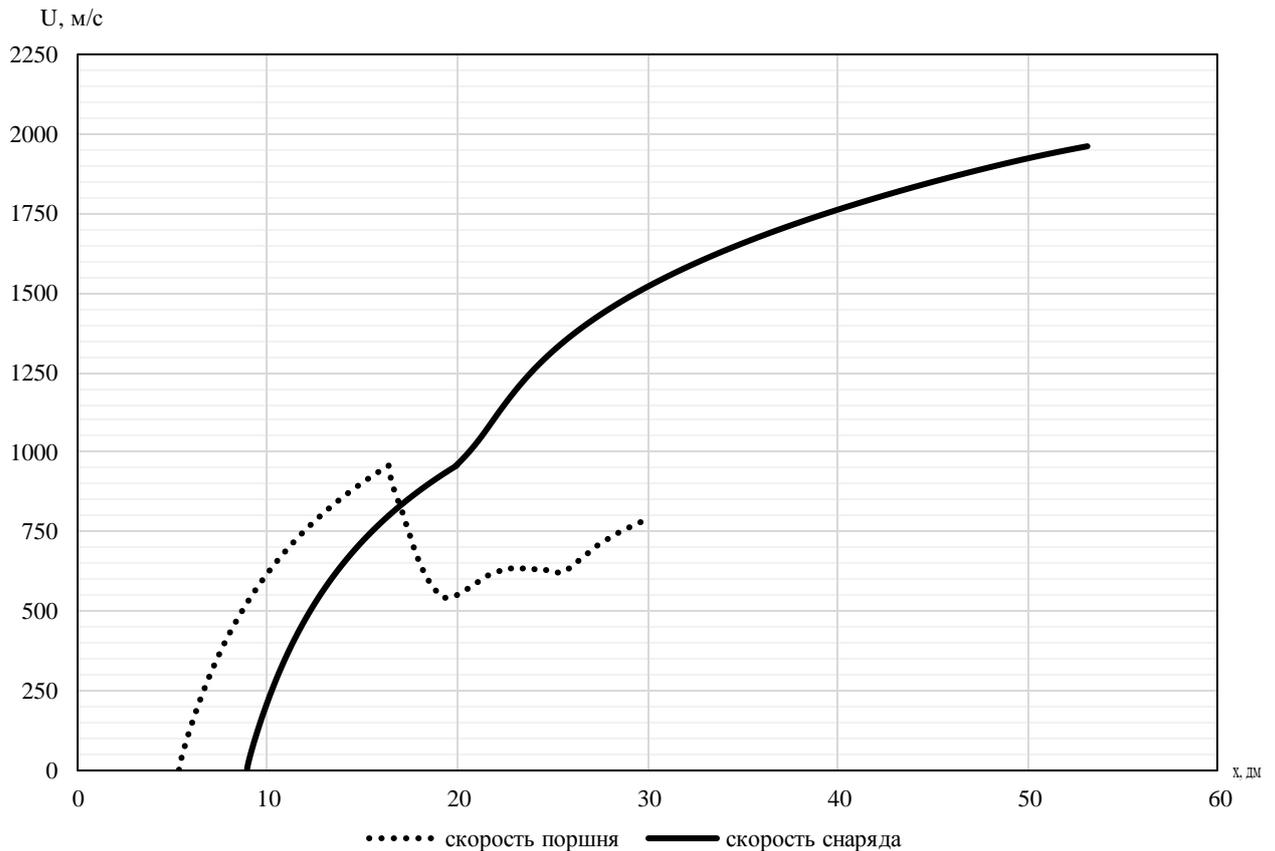


Рисунок 5.4 – График скорости снаряда в зависимости от координаты по результатам работы программы с данными системы калибра 125 мм эстафетной схемы

По полученному графику на Рисунок 5.4 видно, что после зажигания присоединённого заряда в области II, сборка разделяется, метаемый элемент резко ускоряется, а поршень значительно тормозится. После произошедшего перераспределения энергии пороховых газов давление на снаряд становится больше, чем на поршне, что отражается в более эффективном подгоне метаемого элемента.

Поскольку график скорости построен в зависимости от координаты, которая представляет собой местонахождение элемента (поршня или метаемого элемента), можно заметить, что при разделении сборки (поршень при этом находится на расстоянии в 16,5 дм от казённого) происходит разгон метаемого элемента и торможение поршня. Также заметно, что кривая скорости поршня

заканчивается по координате раньше, чем кривая скорости снаряда, так как программа заканчивает работу, как только снаряд покидает дульный срез.

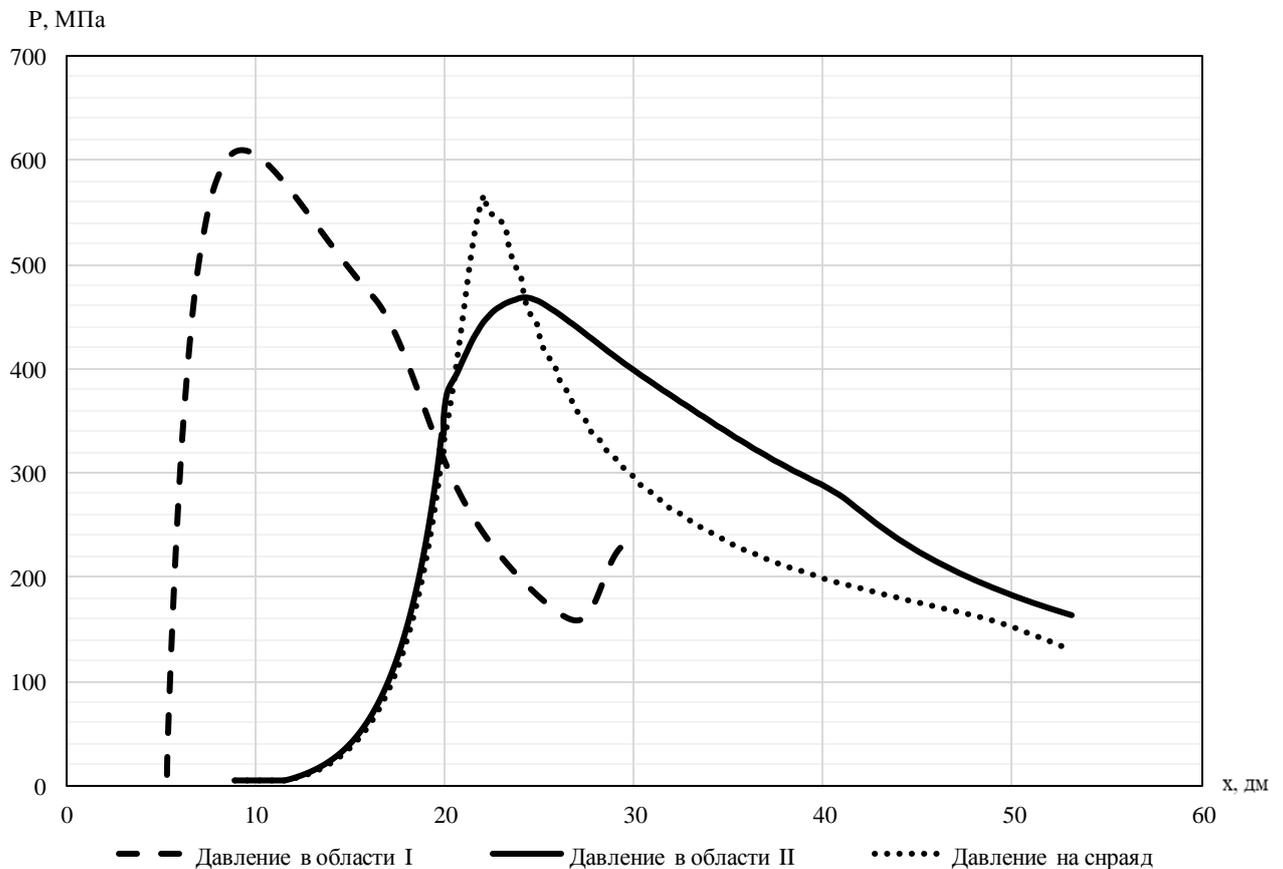


Рисунок 5.5 – График давления в областях I и II и на снаряд в зависимости от координаты с данными системы калибра 125 мм эстафетной схемы

На Рисунок 5.5 изображён график давления в областях I и II и на снаряд в зависимости от координаты с данными системы калибра 125 мм. Поскольку осуществляется задержка зажигания, давление в области II начинает расти уже после перетекания горячих пороховых газов в область II через входные отверстия.

Для системы калибра 125 мм используется конфигурация, в которой масса заряда, находящегося в области I, чуть больше массы заряда, находящегося в области II. Подобрана такая конфигурация вследствие параметров орудия, которое не позволяет критических скачков давления пороховых газов внутри ствола.

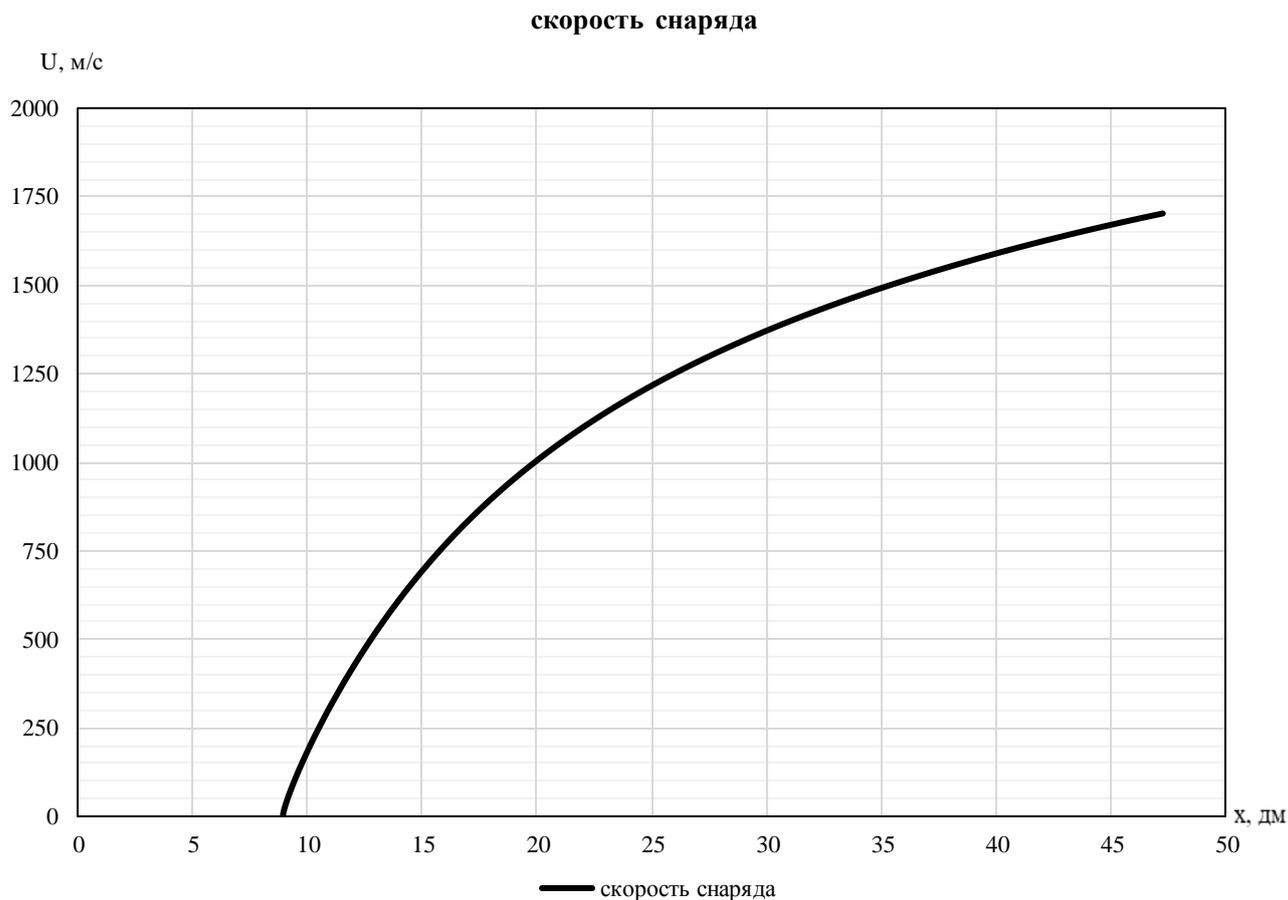


Рисунок 5.6 – График скорости снаряда в зависимости от координаты по результатам работы программы с данными системы калибра 125 мм классической схемы

На Рисунок 5.6 представлен график скорости снаряда в зависимости от координаты по результатам работы программы с данными системы калибра 125 мм классической схемы.

Поскольку на рисунке отображён график скорости снаряда, выстрел которого происходит по классической схеме, дополнительного разгона снаряда не происходит.

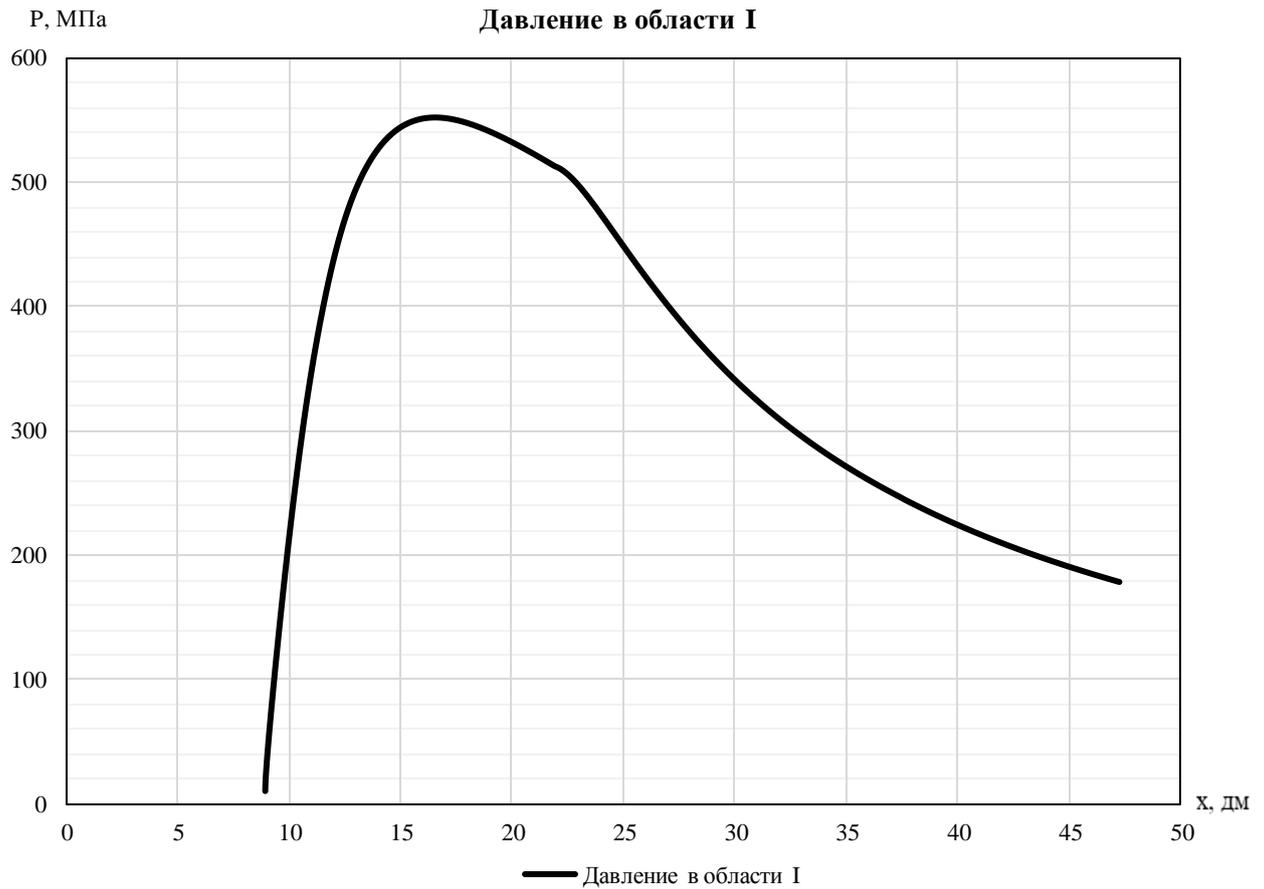


Рисунок 5.7 – График давления в заснарядном пространстве в зависимости от координаты с данными системы калибра 125 мм классической схемы

На Рисунок 5.7Рисунок 5.6 представлен график давления в заснарядном пространстве в зависимости от координаты по результатам работы программы с данными системы калибра 125 мм классической схемы.

Поскольку на рисунке отображён график давления в заснарядном пространстве, выстрел которого происходит по классической схеме, на графике представлена только одна область – область с единственным зарядом. Самой сборки в классической схеме не существует, единственное разделение, которое происходит в классической схеме, разгоняет только снаряд. Отсюда не происходит дополнительных всплесков давления.

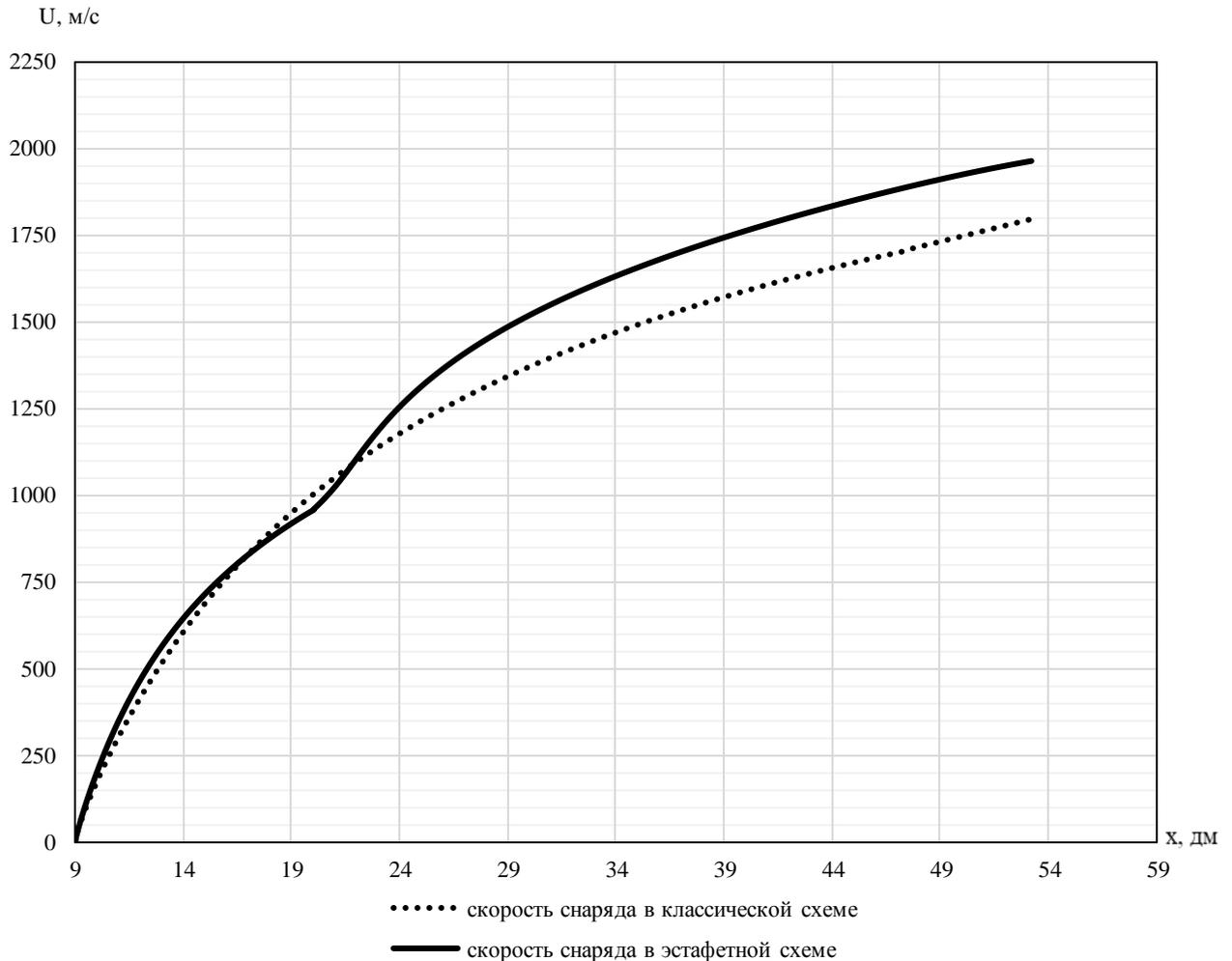


Рисунок 5.8 – График сравнения скоростей снаряда в зависимости от времени по результатам работы программы с данными системы калибра 125 мм классической и эстафетной схем

Рисунок 5.8 показывает в сравнении результаты работы системы 125 мм для классической схемы метания и эстафетной схемы метания. На графике представлены скорости снаряда для каждой из схем. Разница в старте по координате объясняется конструкцией снаряда, используемой в каждой из схем.

Выходная скорость снаряда для классической схемы составила 1791,24 м/с.

Выходная скорость снаряда для эстафетной схемы составила 1999,56 м/с.

Прирост в выходной скорости снаряда в сравнении с классической схемой составил 11%.

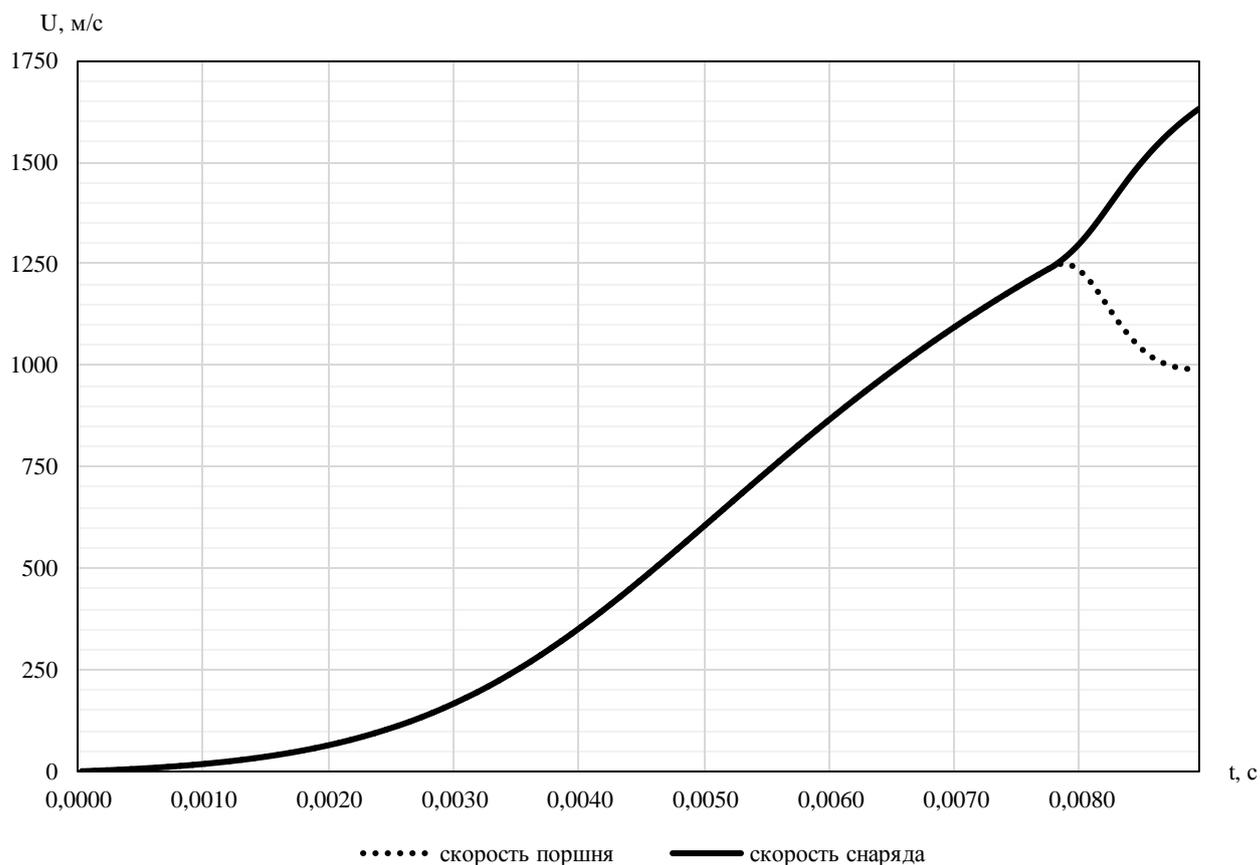


Рисунок 5.9 – График скоростей поршня и снаряда в зависимости от времени по результатам работы программы с данными системы калибра 100 мм эстафетной схемы

График построен в зависимости от времени, поэтому можно заметить, что разделение сборки происходит довольно поздно во время выстрела. Однако, стоит отметить, что после зажигания начального слоя порохового заряда в области II происходит разделение сборки, что влечёт за собой дополнительное ускорение снаряда. Чем выше скорость снаряда, тем большее расстояние он способен проходить за единицу времени. Программа прекращает работу ровно в тот момент, когда зарегистрировано, что левая граница снаряда покидает дульный срез, поэтому наибольшее расстояние снарядом преодолевается именно после разделения сборки.

Чтобы отразить, где именно происходит разделение сборки, все следующие графики будут построены именно в зависимости от координаты.

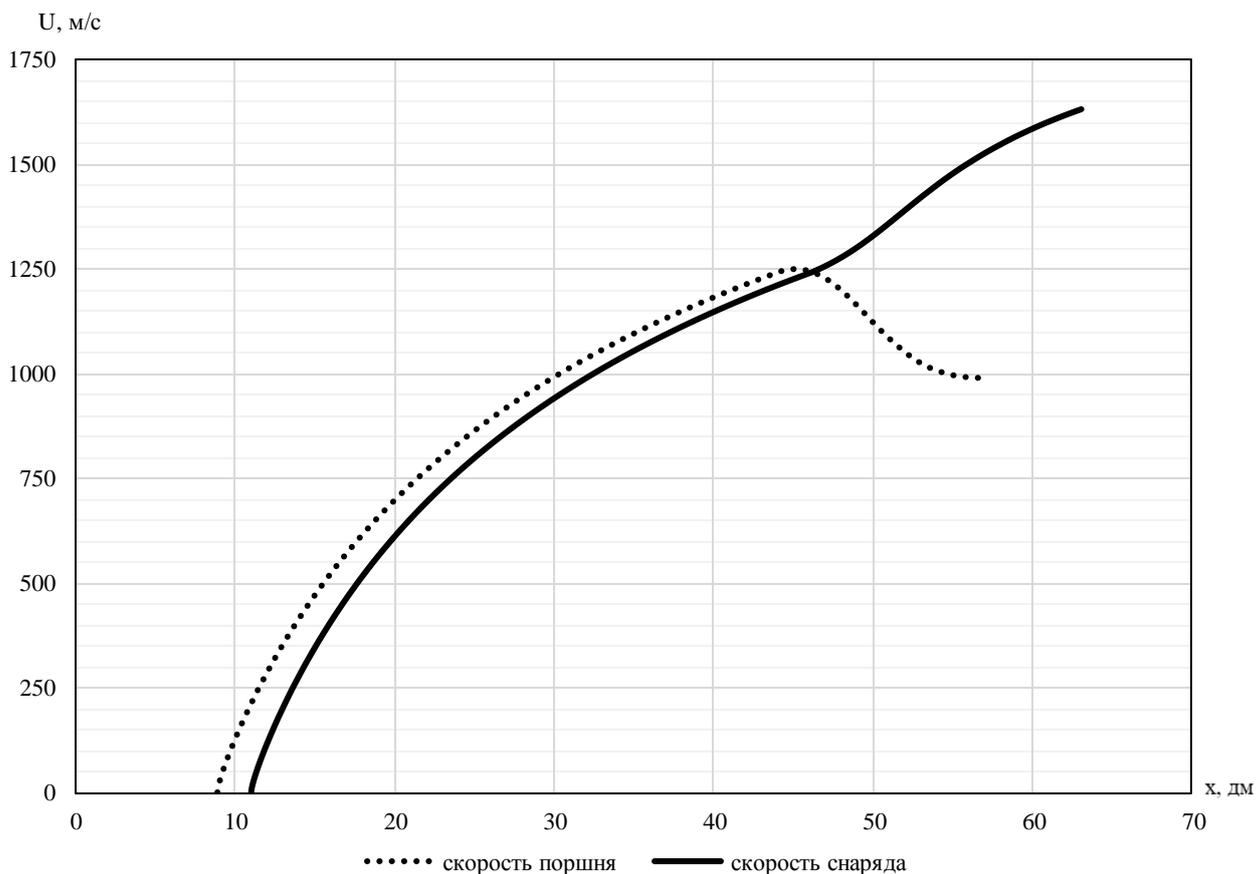


Рисунок 5.10 – График скорости снаряда в зависимости от координаты по результатам работы программы с данными системы калибра 100 мм эстафетной схемы

В качестве источника параметров артиллерийского орудия и существующих снарядов использовалась условная модификация 100-мм орудия 2А70.

По полученному графику на Рисунок 5.10 видно, что после зажигания присоединённого заряда в области II, сборка разделяется, метаемый элемент резко ускоряется, а поршень значительно тормозится. После произошедшего перераспределения энергии пороховых газов давление на снаряд становится больше, чем на поршне, что отражается в более эффективном подгоне метаемого элемента.

Поскольку график скорости построен в зависимости от координаты, которая представляет собой местонахождение элемента (поршня или метаемого элемента), можно заметить, что при разделении сборки (поршень при этом

находится на расстоянии в 45,5 дм от казённого) происходит разгон метаемого элемента и торможение поршня. Также заметно, что кривая скорости поршня заканчивается по координате раньше, чем кривая скорости снаряда, так как программа заканчивает работу, как только снаряд покидает дульный срез.

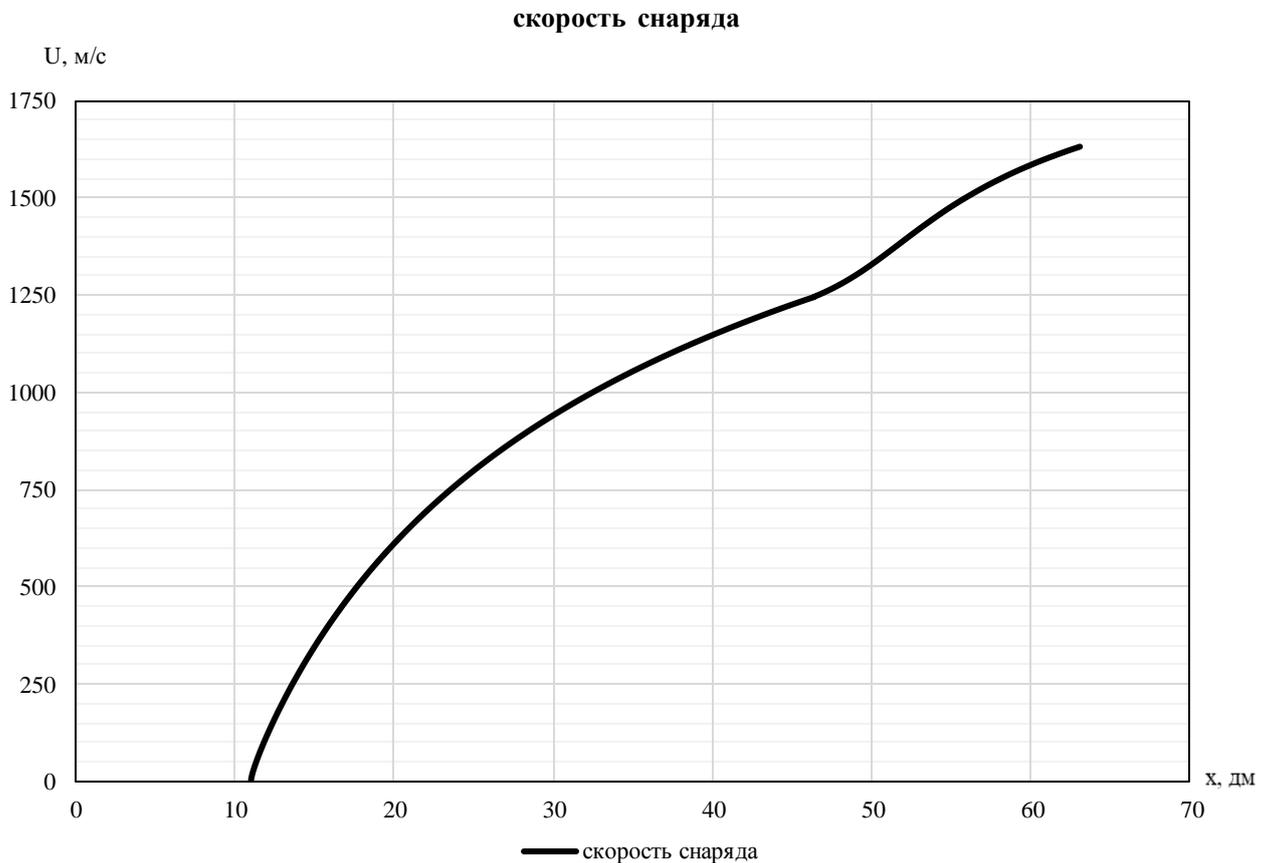


Рисунок 5.11 – График скорости снаряда в зависимости от координаты по результатам работы программы с данными системы калибра 100 мм эстафетной схемы

Как и в предыдущем примере системы 125 мм, на графике с Рисунок 5.11 можно увидеть, как снаряд получает значительное ускорение после начала горения дополнительного заряда.

Поскольку график построен в зависимости от координаты, можно заметить, что ускорение снаряда происходит на отметке в 47,6 дм. По этой же причине кривая берёт начало не из точки $x = 0$, так как снаряд находится дальше в стволе, как видно по Рисунок 2.1.

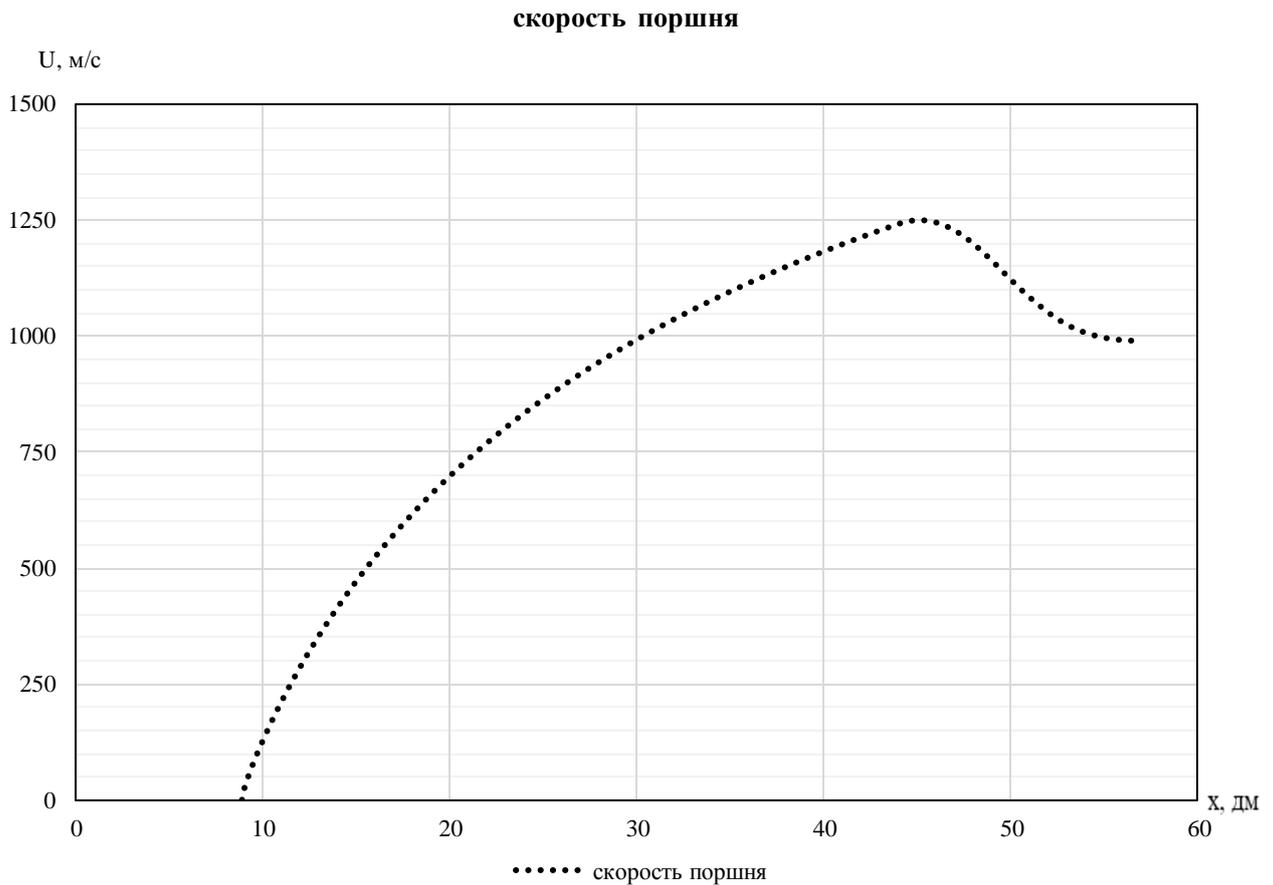


Рисунок 5.12 – График скорости поршня в зависимости от координаты по результатам работы программы с данными системы калибра 100 мм эстафетной схемы

Предыдущий график с Рисунок 5.11 показывал скорость снаряда в зависимости от координаты. Рисунок 5.12 в свою очередь отображает график скорости поршня в зависимости от координаты по результатам работы программы с данными системы калибра 100 мм.

Поскольку график построен в зависимости от координаты, можно заметить, что ускорение поршня происходит на отметке в 45,5 дм. По этой же причине кривая берёт начало не из точки $x = 0$, так как поршень находится дальше в стволе, как видно по Рисунок 2.1.

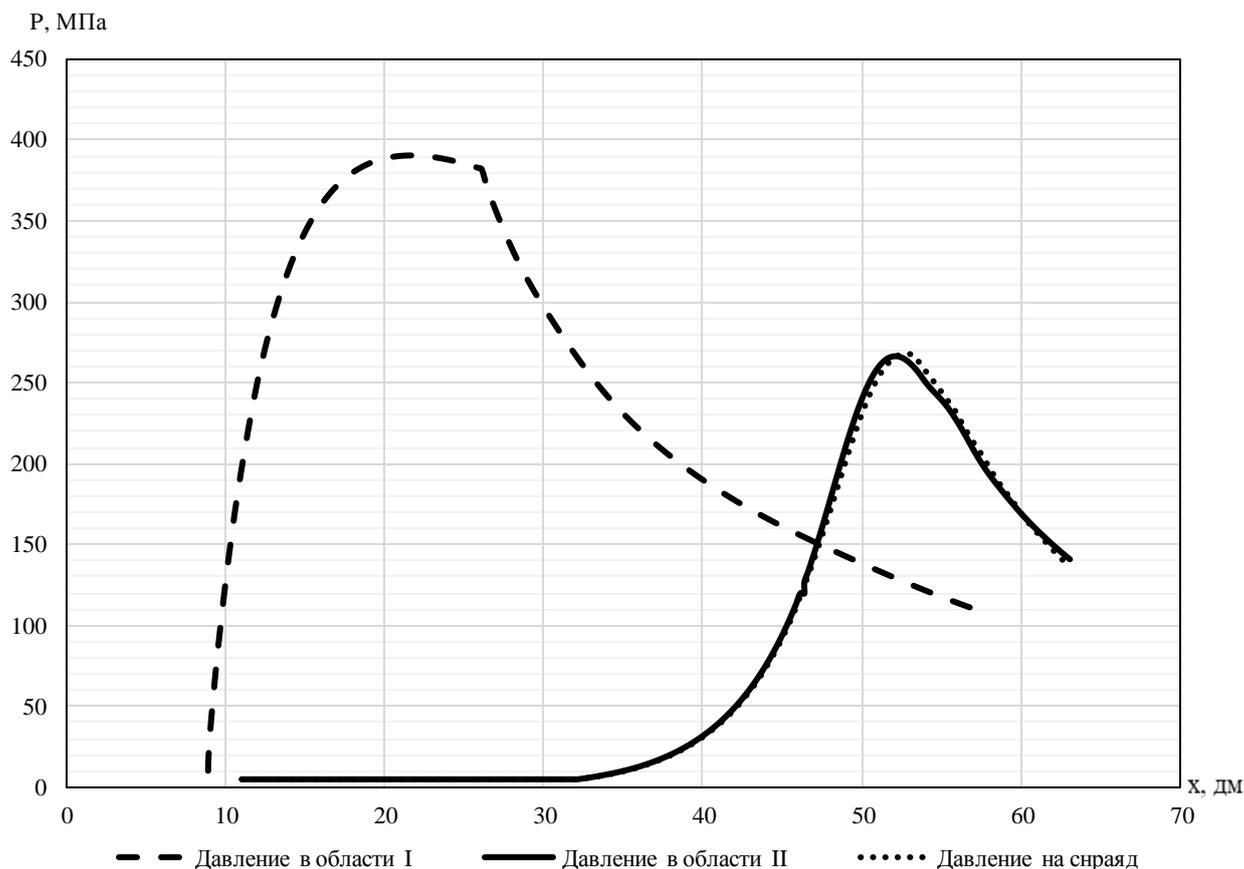


Рисунок 5.13 – График давления в областях I и II и на снаряд в зависимости от координаты с данными системы калибра 100 мм эстафетной схемы

На Рисунок 5.13 изображён график давления в областях I и II и на снаряд в зависимости от координаты с данными системы калибра 100 мм.

Для системы калибра 100 мм используется конфигурация, в которой объём заряда, находящегося в области I, гораздо больше заряда, находящегося в области II. Подобрана такая конфигурация вследствие параметров орудия, которое не позволяет критических скачков давления пороховых газов внутри ствола.

На графике видно, что максимальное давление, достигаемое внутри любой из областей, не превышает ресурс орудия, установленный производителем в 450 МПа. Максимальное давление в области I составляет 390,49 МПа, максимальное давление в области II – 266,43 МПа.

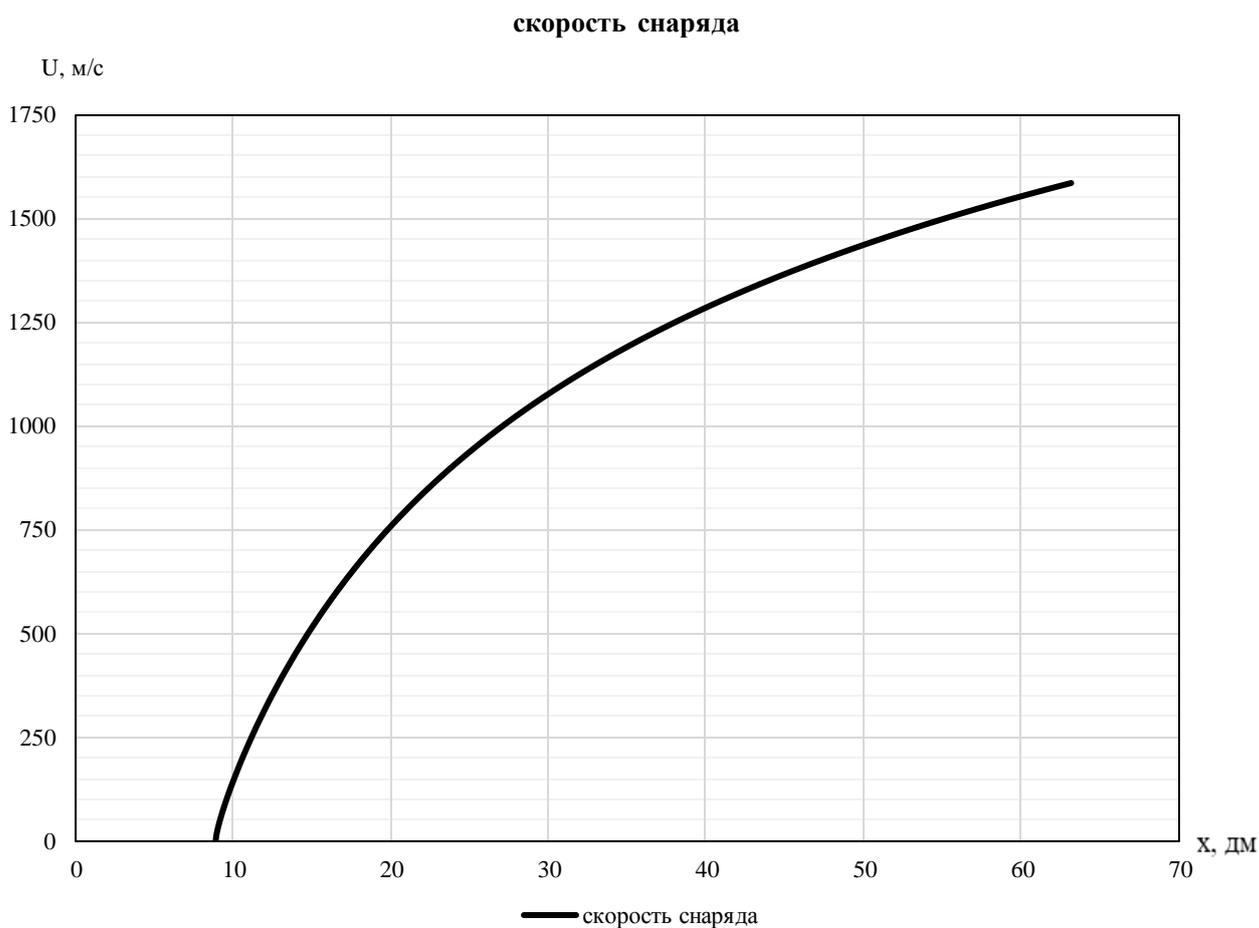


Рисунок 5.14 – График скорости снаряда в зависимости от координаты по результатам работы программы с данными системы калибра 100 мм классической схемы

На Рисунок 5.14 представлен график скорости снаряда в зависимости от координаты по результатам работы программы с данными системы калибра 100 мм классической схемы.

Поскольку на рисунке отображён график скорости снаряда, выстрел которого происходит по классической схеме, дополнительного разгона снаряда не происходит.

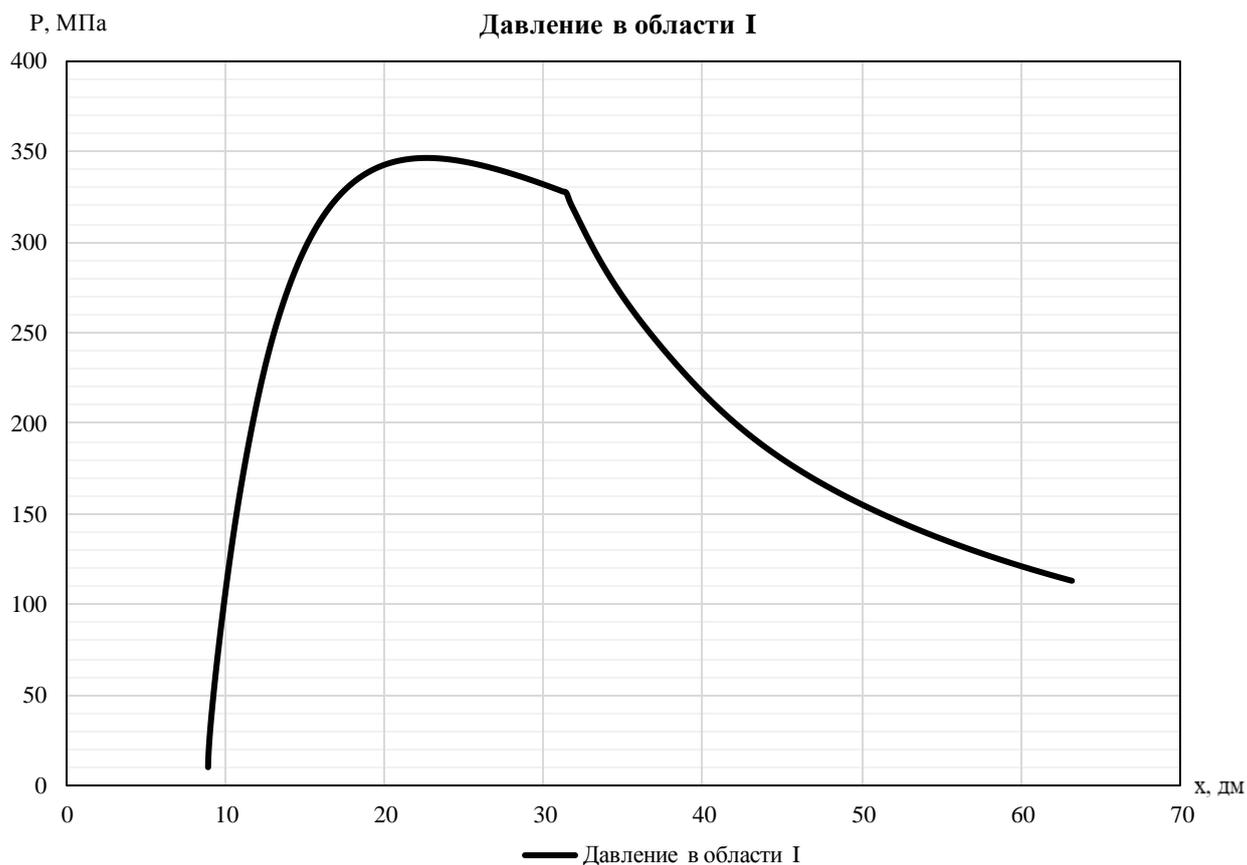


Рисунок 5.15 – График давления в заснарядном пространстве в зависимости от координаты с данными системы калибра 125 мм классической схемы

На Рисунок 5.15 Рисунок 5.6 представлен график давления в заснарядном пространстве в зависимости от координаты по результатам работы программы с данными системы калибра 100 мм классической схемы.

Поскольку на рисунке отображён график давления в заснарядном пространстве, выстрел которого происходит по классической схеме, на графике представлена только одна область – область с единственным зарядом. Самой сборки в классической схеме не существует, единственное разделение, которое происходит в классической схеме, разгоняет только снаряд. Отсюда не происходит дополнительных всплесков давления.

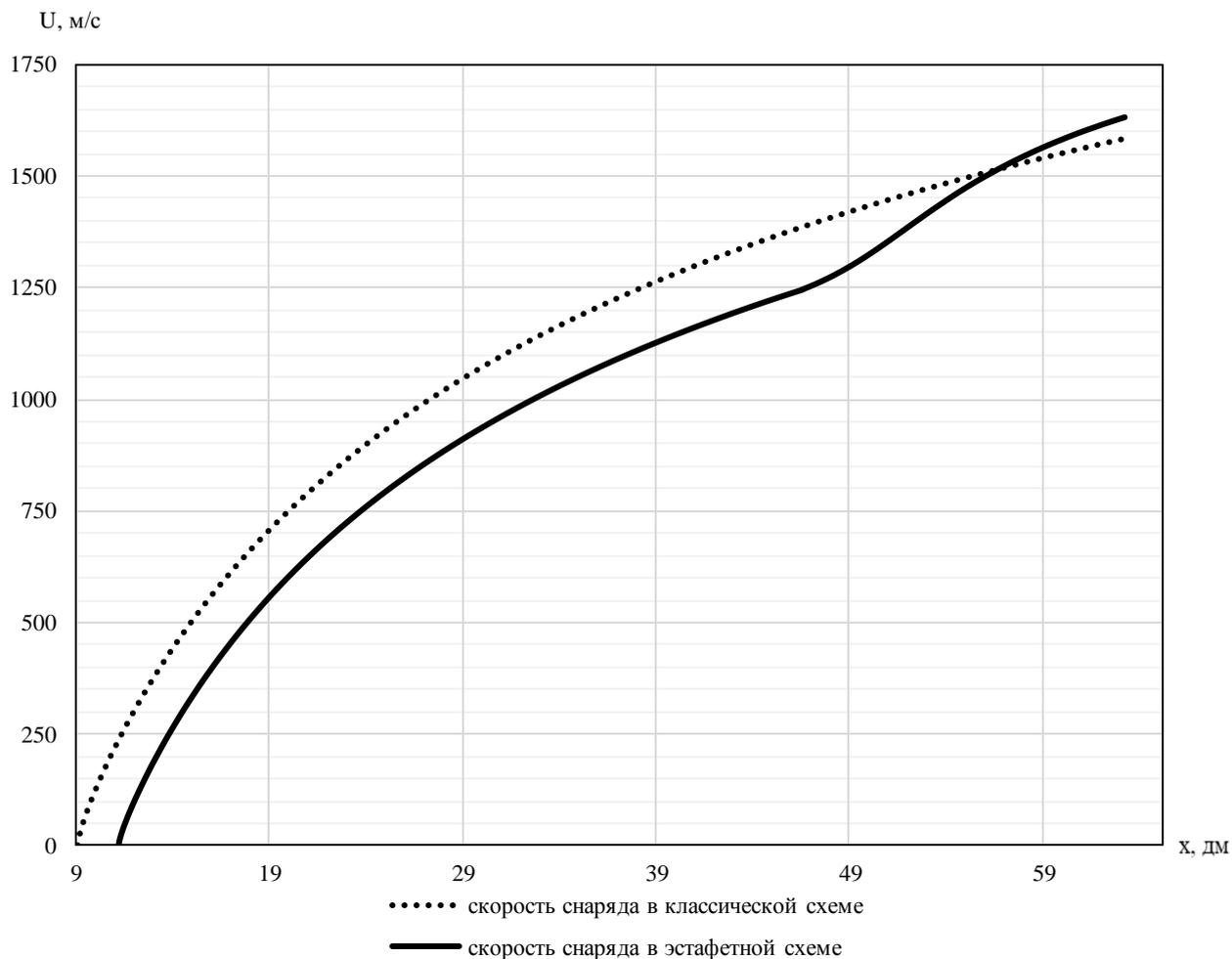


Рисунок 5.16 – График сравнения скоростей снаряда в зависимости от времени по результатам работы программы с данными системы калибра 100 мм классической и эстафетной схем

Рисунок 5.16 показывает в сравнении результаты работы системы 100 мм для классической схемы метания и эстафетной схемы метания. На графике представлены скорости снаряда для каждой из схем. Разница в старте по координате объясняется конструкцией снаряда, используемой в каждой из схем.

Выходная скорость снаряда для классической схемы составила 1582,25 м/с.

Выходная скорость снаряда для эстафетной схемы составила 1631,73 м/с.

Прирост в выходной скорости снаряда в сравнении с классической схемой составил 3,11%.

5.2 Методы и средства теоретического улучшения системы

Направление, в котором проводилось данное исследование, всё ещё является перспективным, ибо совершенствование схем метания без внесения кардинальных изменений в конструкции самих орудий является отличным вариантом для улучшения характеристик орудия, способного использовать боеприпасы, созданные с использованием данной схемы метания. Поэтому в дальнейшем может проводиться обеспечение проведения исследовательских работ по улучшению характеристик баллистической системы среднего калибра.

Как уже упоминалось в ходе данного исследования, от входных параметров системы, которые указываются при расчёте математической модели, поэтому подготовка набора наиболее подходящих параметров для схемы метания может способствовать получению ещё большего прироста к начальной скорости снаряда без критических скачков давления на дно и стенки канала.

В ходе исследования была создана на этапе проектирования новая схема метания, основанная на принципе, схожем с эстафетной схемой метания.

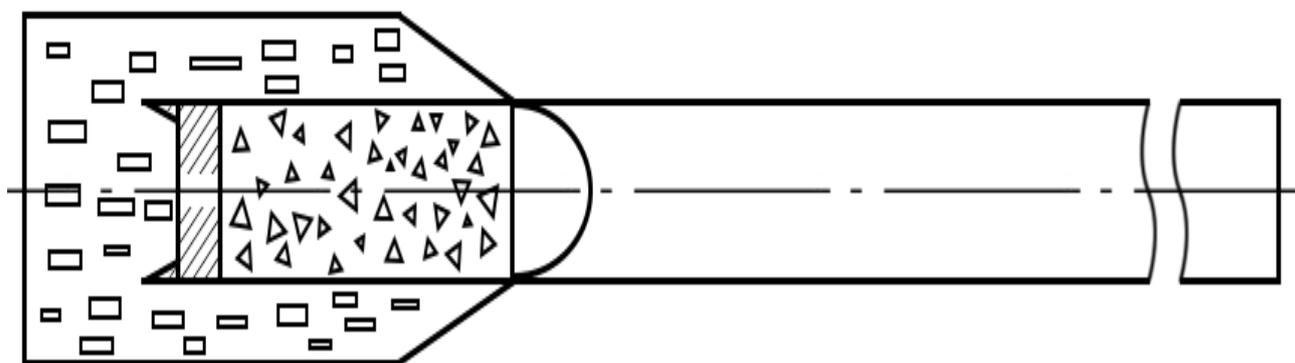


Рисунок 5.17 – Схема с выдвигающимся зарядом

Новая схема метания, основанная на эстафетной, называется схемой с выдвигающимся зарядом. В области, содержащей первый заряд, содержится область цилиндрической формы, полностью закрытая от первоначального

обмена сред с областью первого заряда. Дополнительная область также имеет дополнительный заряд, который будет зажжён с задержкой относительно зажигания основного заряда. Действие пороховых газов на цилиндр будет работать относительно по тому же принципу, что и в эстафетной схеме на поршень, выталкивая сборку цилиндра и снаряда в дульное пространство, где в определённый момент времени будет совершено зажигание дополнительного заряда, осуществляя принцип, схожий с тем, который был использован в эстафетной схеме.

Стоит заметить компактность сборки относительно сборки эстафетной схемы метания. Цилиндрическая область помещается непосредственно в область основного заряда и, исходя из расположения, оказывается окружена частицами пороха.

Дальнейшие исследования могут брать во внимание схему с выдвигающимся зарядом, так как она может обладать большим потенциалом для увеличения начальной скорости снаряда после завершения работы схемы.

5.3 Рекомендации практического характера

Теоретическим улучшением ограничиться нельзя, ибо в задаче чётко присутствовало построение программной реализации математической модели на языке программирования. Исходя из этого, это программное решение может быть модифицировано, использовано в других решениях, на других, более мощных платформах, входит в целый комплекс современных сервисов.

Исследователем в ходе создания, тестирования и анализа результатов программного обеспечения были выдвинуты некоторые рекомендации технического характера, которые, по мнению исследования, могут привести программное решение к более совершенному виду.

Полученную в ходе работ, описанных в Глава 4, программную реализацию, можно модифицировать для запуска и работы на суперкомпьютере. Суперкомпьютер Тольяттинского государственного университета основан на использовании технологии CUDA, использующая вычислительные мощности большого количества виртуальных ядер для

обеспечения наиболее оптимальной нагрузки на все ядра. Поскольку теоретическое распараллеливание было уже рассмотрено в разделе 4.2, хоть и использовалась технология OpenCL для распараллеленного доступа к вычислительным мощностям имеющейся в распоряжении исследователя видеокарты AMD Radeon RX 470, существующему программному решению потребуется модификация, заключающаяся в портировании исходного кода хост-системы и конфигурации ядра с OpenCL C на CUDA C, для совместимости с технологией CUDA. При процессе портирования будет должным образом обратит внимание на особенности целевой платформы в целом и диалекта CUDA C в частности, так как OpenCL и CUDA являются несовместимыми друг с другом.

В разделе 5.2 рассматривалось улучшение работы математической модели, исходя из входных параметров, которые этой модели необходимы. Для нахождения наиболее подходящих параметров для той или иной конфигурации схемы метания, описанной математической моделью, стоит воспользоваться преимуществами генетических алгоритмов.

Генетический алгоритм способен эффективно решать задачу, под которую он был приспособлен, поэтому, по мнению исследователя, при модификации программного обеспечения, полученного в Глава 4, для включения этапа работы генетического алгоритма для подсчёта различных конфигураций параметров для данной схемы метания, вкуче с быстротой вычислений современных рабочих станций, можно довольно быстро получать наиболее подходящие для данной конфигурации параметры, такие как количество заряда в каждой из областей, размер каждой из областей, вес поршня, вес снаряда и т.д.

В последнее время определённую популярность набирают искусственные нейронные сети, в свою очередь являющиеся математической моделью, программно реализованной, построенной по принципу функционирования реальных нейронных сетей, построенных из нервных клеток живого организма. Несмотря на своё устройство в виде системы взаимодействующих между собой простых процессоров, «нейронов», возможно выполнение довольно сложных

задач. Нейронные сети обучаются, что даёт им преимущество перед традиционными алгоритмами.

Исследователь предполагает, что использование специально спроектированной нейронной сети и имеющаяся база данных уже просчитанных конфигураций параметров схемы метания, используемая в качестве материала для обучения нейронной сети, позволит получить систему, способную находить наиболее подходящие параметры для схем принципиально новых схем метания, не прибегая к использованию времязатратных переборов параметров вручную.

Заключение

В рамках данной работы было проведено исследование энергетических газодинамических процессов внутренней баллистики и полученные знания были применены на примере принципиально новой эстафетной схемы метания. Описание газодинамических процессов во время выстрела считаются гораздо более полными и точными чем термодинамических, поэтому использование описания именно газодинамических процессов считается более рациональным для использования в математической модели.

Анализ существующих схем метания, классической и нетрадиционных, показал, что без внесения модификаций в конструкцию снаряда довольно затруднительным является получение существенного прироста в скорости. Поэтому приоритет в данном направлении отдаётся нетрадиционным схемам метания.

По эстафетной схеме метания была описана её математическая модель, отвечающая за основные газодинамические процессы, происходящие во время выстрела, начиная от зажигания первого слоя заряда, заканчивая вылетом снаряда за дульный срез, где процессы, описываемые внутренней баллистикой, уже не имеют влияния на снаряд.

Эстафетная модель была модифицирована, что повлекло за собой создание схемы с выдвигающимся зарядом, сохранившей принцип использования двух камер с двумя зарядами, с обеспеченной задержкой зажигания второго заряда.

Математическая модель эстафетной схемы была реализована в программном виде, используя разностную схему из описания математической модели, опробована версия программного решения с использованием параллельных вычислений на базе программного пакета OpenCL для обеспечения вычислений с помощью чипов различных типов, включая графический процессор, отвечающий за вычисления, производимые на графической карте.

Представлены результаты вычислений, полученных после работы данной реализации, для нескольких конфигураций систем среднего калибра: 125 мм, 100 мм, считающихся наиболее подходящими для получения существенного прироста к начальной скорости снаряда на выходе из дульного среза. Прирост скорости в данном случае составил в среднем 9%. Проведённое сравнение результатов работы схем метания, классической и эстафетной, показало прирост скорости снаряда порядка 17%.

С научной точки зрения, показано, как применение компьютерных моделей высокоэнергетических процессов (в данном контексте высокоэнергетических процессов во внутренней баллистике) помогает при параметрическом исследовании значительно улучшать энергетические характеристики баллистических систем.

Список используемой литературы

1. Серебряков М.Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. Москва: Оборонгиз, 1962.
2. Рябов А.С. Метод решения главной задачи внутренней баллистики. Москва: МСХМ, 1949. 105 с.
3. Крилл ЛМ, редактор. Современная техника аэродинамических исследований при гиперзвуковых скоростях. Москва: Машиностроение, 1965. 539 с.
4. Вентцель Д.А. Внутренняя баллистика. Москва: ВВА им. Н. Е. Жуковского, 1939. 414 с.
5. Бетехин С.А., Веницкий А.М., Горохов М.С., Станюкович К.П. Газодинамические основы внутренней баллистики. Москва: Оборонгиз, 1957. 384 с.
6. Corner J. Theory of the Interior Ballistics of Guns. London: New York, 1950. 462 pp.
7. Тавернье П. Внутренняя баллистика. НИИ-ЗГАУ, 1956. 256 с.
8. Cels A., Simonin R. Improvement in or relating to ballistic devices and projectiles, 1273208, 1972.
9. Русяк И.Г., Ушаков В.М. Внутрикамерные гетерогенные процессы в ствольных системах. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 259 с.
10. Горохов М.С. Сравнительная оценка различных баллистических путей увеличения скорости снаряда. Томск: ТГУ, 1952. 516 с.
11. Welfried N. Verfahren zum Erreichen einer erhöhte Beschleunigung von Geschossen in Rohren, 2934848, 1980.
12. Birgigt L. Shell cartridges, 3724377, 1973.
13. Kirshner H.A. Multi-staged ballistic device, 3388633, 1969.
14. Златин Н.А., Красильников А.П., Мишин Г.И., Попов Н.Н. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях. Москва:

- Наука, 1974. 344 с.
15. Вилунов В.Н. Теория зажигания конденсированных веществ. Новосибирск: Наука, 1984. 189 с.
 16. Якушев С.К. Распад произвольного разрыва в канале со скачком сечения // Известия СО АН СССР. 1967. No. 2. pp. 109-120.
 17. Горохов М.С. Внутренняя баллистика ствольных систем. Москва: ЦНИИ Информации, 1985. 160 pp.
 18. Иванов М.Я., Нигматулин Р.З. Неявная схема С.К. Годунова повышенной точности для интегрирования уравнений Эйлера // Журнал вычислительной математики и математической физики, Vol. 27, No. 11, 1987. pp. 1725-1735.
 19. Годунов С.К. Численное решение многомерных задач газовой динамики. Москва: Наука, 1976. 400 pp.
 20. Рихтмайер Р., Мортон К. Разностные методы решения краевых задач. Москва: Мир, 1972.
 21. Бахвалов Н.С. Численные методы. Москва: Наука, 1973.
 22. Tay R. OpenCL Parallel Programming Development Cookbook. Packt Publishing Ltd, 2013.
 23. Семёнов Р.И. Оптимизация параметров системы эстафетного выстрела с использованием генетического алгоритма // Труды международной конференции "Система обеспечения пожарной безопасности. Состояние, тенденции, пути развития", 2017. pp. 215-218.
 24. Гринько Г.В., Сафронов А.И. Внутренняя баллистика ствольной системы эстафетной схемы // Материалы III научно-практической всероссийской конференции (школы-семинара) молодых ученых, 2017. pp. 132-134.
 25. Карпов, В.Е. Численные методы, алгоритмы и программы. Введение в распараллеливание [Текст]: учебное пособие для вузов / В.Е. Карпов, А.И. Лобанов. — М.: Издат-во Москов. физ.-технич. института, 2014. — 190 с.
 26. Качко, Е.Г. Параллельное программирование [Текст]: учебное пособие / Е.Г. Качко. — Харьков: Форт, 2011. — 528 с.

27. Колесов, Ю.Б. Компонентные технологии математического моделирования [Текст]: учебное пособие / Ю.Б. Колесов, Ю.Б. Сениченков. — Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета, 2013. — 233 с.
28. Косяков, М.С. Введение в распределенные вычисления [Текст] / учебное пособие / М.С. Косяков. — Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2014. — 155 с.
29. Lupin, S.A., Posypkin, M.A. Технологии параллельного программирования [Текст]: учебник / С.А. Лупин, М.А. Посыпкин. М.: ИД «ФОРУМ»: ИНФРА-М, 2011. — 208 с.
30. Мареев, В.В. Основы методов конечных разностей [Текст]: учебное пособие / В.В. Мареев, Е.Н. Станкова. — СПб.: Издательство С. – Петербургского университета, 2012. — 64 с.
31. Ныгматулин, Р. И. Динамика многофазных сред [Текст]: учебник / Р.И. Ныгматулин. — М.: Наука, 1987. — Часть I. — 464 с. Часть II. — 360 с.
32. Петров, В.Ю. Информатика. Алгоритмизация и программирование. [Текст]: учебное пособие / В.Ю. Петров. — Часть 1 — Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2015. — 91 с.
33. Радаев, А.В. Основы огневой подготовки: учебное пособие / А.В. Радаев — ГМА им. адм. С.О.Макарова, — Санкт-Петербург, 2010. — 62 с.
34. Радченко, Г.И. Распределенные вычислительные системы [Текст]: учебное пособие / Г.И. Радченко. — Челябинск: Фотохудожник, 2012. — 184 с.
35. Цимбал, А.А. Параллельные алгоритмы. Разработка и реализация [Текст]: учебное пособие / А.А. Цимбал. — М.: Бином «ИНТУИТ», 2014. — 344 с.
36. Эндрюс, Г.Р. Основы многопоточного, параллельного и распределенного программирования [Текст]: учебник / Г.Р. Эндрюс. М.: «Вильямс», 2003. — 512 с.
37. Егоров, М.Ю., Парфёнов, А.Ю., Егоров, Д.М. Численное исследование динамики внутрикамерных процессов при срабатывании артиллерийского выстрела [Текст] / М.Ю. Егоров, А.Ю. Парфёнов, Д.М. Егоров // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника, № 32, 2012. - С. 50-66.

38. Егоров, М. Ю., Парфёнов, А. Ю. Численное моделирование процесса срабатывания дульного тормоза артиллерийского орудия [Текст] / М.Ю. Егоров, А.Ю. Парфёнов // Вестник Ижевского государственного технического университета, №4, 2013. - С. 155-158.
39. Сафронов, А.И. Внутренняя баллистика ствольной системы с присоединенной камерой подгона [Текст] / А.И.Сафронов, А.Ю. Крайнов // Вестник ТГПУ, Вып.6 (43), 2004. – С. 67-70.
40. Сафронов, А.И. Использование нетрадиционной схемы метания в баллистических схемах [Текст] / А.И. Сафронов, Л.В. Комаровский // Международная конференция по математике и механике: Избранные доклады / Под общей редакцией Н.Р. Щербакова. — Томск, 2003. – С.182-187.
41. Семенов, И. В., Меньшов, И. С., Подложнюк, А. Д., Ахмедьянов, И. Ф. Численное моделирование теплового состояния ствола артиллерийского орудия при выстреле [Текст] / И.В. Семенов, И.С. Меньшов, А.Д. Подложнюк, И.Ф. Ахмедьянов // Горение и взрыв, Т. 7. № 7, 2014. – С. 374-379.