

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 систем малого калибра для

повышения начальных скоростей метания

Студент А.Е. Осин

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, 2019 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 Модели газопороховой и двухскоростной сред.....	23
2.3 Математическая модель	28
2.4 Разностная схема	36
2.5 Расчёт шага	39
Глава 3 Изучение внутренней баллистики систем малого калибра.....	43
3.1 Внутренняя баллистика систем с разделением заряда.....	43
3.1.1 Подбор параметров эстафетной схемы.....	43
3.1.2 Сравнение возможностей классической и предложенной схем выстрела	45
3.2 Баллистика системы с учетом сопротивления воздушного столба	55
3.3 Баллистика системы с разделением заряда на три части.....	58
3.4 Баллистика системы с выдвигающимся зарядом.....	62
3.4.1 Описание схемы с выдвигающимся зарядом.....	64
Заключение	67
Список использованных источников	69

Введение

Особенно эффективно использование математического моделирования для исследования быстро протекающих процессов в системах, где основной процесс скрыт от прямого наблюдения и представляет непосредственную опасность из-за высоких сопутствующих параметров, например, давлений в канале изучаемых систем. Именно такими объектами являются баллистические системы малого калибра, обеспечивающие скорости метаемых элементов превосходящие скорости звука в метающем топливном газе. Опасность жизнедеятельности меняет представление о различных процессах, которые можно наблюдать в отдельных отраслях человеческой деятельности, 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 процесс, 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 теоретической оценки 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 предлагаемой 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 малого калибра. Статьи были опубликованы в рамках IV научно-практической всероссийской конференции (школы-семинара) молодых ученых «Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук», проходившей 22-24 апреля 2018 года в г. Тольятти и в рамках V научно-практической всероссийской конференции (школы-семинара) молодых ученых «Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук», проходившей 22-24 апреля 2019 года в г. Тольятти.

Объем и структура диссертации: диссертационное исследование состоит из введения, 3 глав, заключения, библиографии (43 наименование). Работа изложена на 73 страницах, содержит 15 рисунков, таблиц 2.

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 метаемого элемента и повышения его начальной скорости.

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 величины давления как на дно канала, так и во всей заснарядной области.

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 процесс превращения 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 начинает 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, с которого 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 описывается.

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 внутривствольной области.

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

Длительность второго периода заключается от момента сгорания порохового заряда до момента, в который снаряд покидает внутривствольную 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 внутривствольных 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, при котором возможны деформации 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 деформация или разрушение 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 $\frac{\omega}{q}$, вызванным увеличенной плотностью заряжения, 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 заряжения 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 заряжения, 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 быть 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.

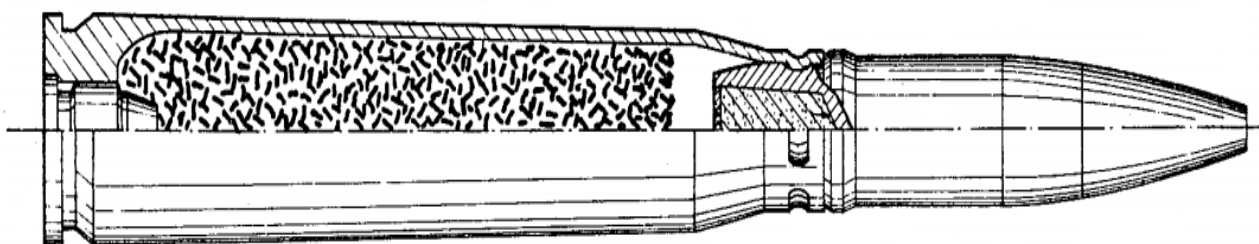


Рисунок 1.1 Схема патента США 3724377

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].

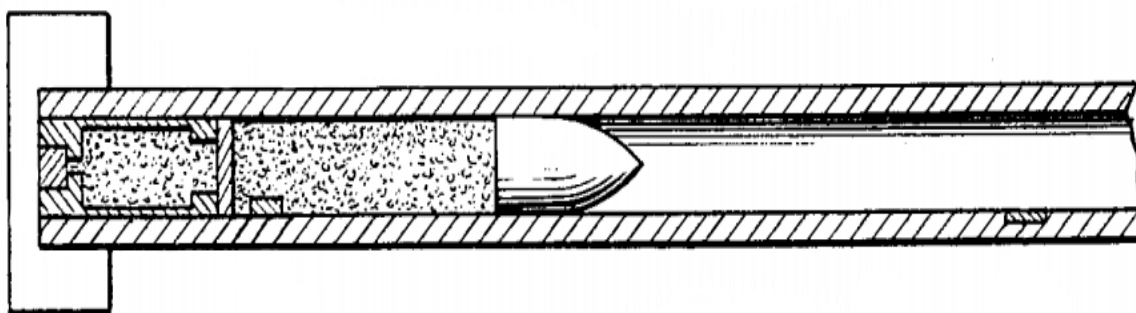


Рисунок 1.2 Схема патента США 3388633

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 для любого метода, в том числе и газодинамического, возможности в рамках той физической модели, которую он описывает ограничены.

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 о процессе, её оперативный анализ, её качественное рассмотрение, наглядное представление результатов. Требования эти особенно актуальны при управлении протеканием процесса 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 сложных газодинамических систем существует целый ряд проблем, требующих своего 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.Виллюнов. 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 на 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 воспламенить 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 капсюля - воспламенителя;
- Когда давление достигает точки форсирования, поршень (вместе с дополнительным или контейнерным зарядом и снарядом) приходит в движение;
- Далее 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 ускоряемого дополнительного заряда энергия порохового газа основного заряда будет преобразовываться в кинетическую энергию толкаемой сборки контейнера. Это в конечном результате должно привести к увеличению переносной скорости метающего газа дополнительного 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.

При использовании такой схемы поджигания, реализуется значительное повышение коэффициента полезного действия основной части заряда, так как под её действием скоряется 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 опишем 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 пункте 1.6.

В начальный момент времени воспламеняется главный (первый) заряд, расположенный в первой расчетной области. Рассчитываемое давление, образуемое вследствие горения заряда, приведет систему в движение. Метаемый элемент 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, равный указанной задержке, когда производится зажигание дополнительного заряда, начинается расчет системы обработки этого заряда. В расчетную систему включается вторая область, находящаяся между движущимся поршнем и снарядом.

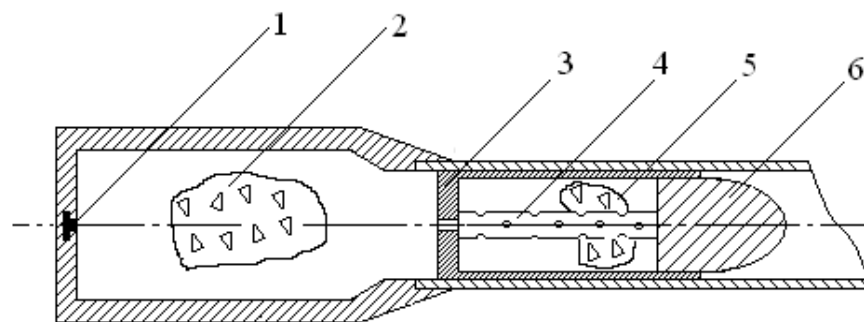


Рисунок 2.1 – Схема эстафетной установки с присоединённым зарядом.

1 – капсюль-воспламенитель; 2 – основная часть заряда; 3 – поршень-перегородка контейнера; 4 – перфорированная трубка; 5 – дополнительная часть заряда; 6 – метаемый элемент.

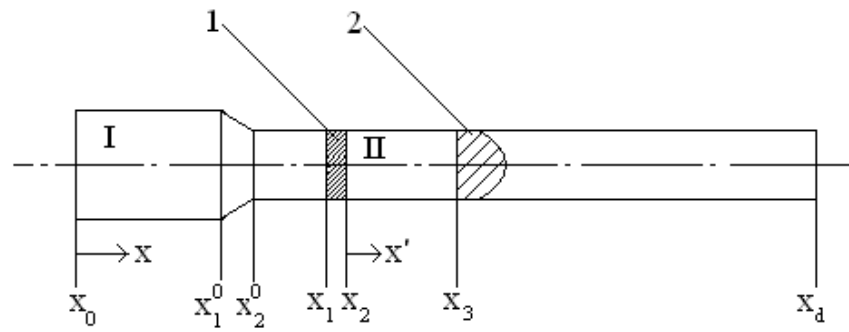


Рисунок 2.2 – Расчётная схема эстафетной установки с дополнительным зарядом. 1 – поршень-перегородка контейнера; 2 – метаемый элемент.

Для повышения точности расчетов используются отдельные для каждой областей системы координат (Рисунок 2.2). Далее получаемые решения стыкуются на границе между областями. Решение ПЗВБ систем эстафетной схемы выстрела или систем с ускоряемой сборкой контейнера дается методом СЭЛ, апробированным для расчетов пороховых баллистических установок.

2.2 Модели газопороховой и двухскоростной сред

Решение ПЗВБ для систем с ускоряемой сборкой контейнера (рассматриваемая эстафетная схема, представленная на Рисунок 2.2) проводится при основных допущениях:

- заряды представлены мелкими пороховыми зёрнами, причем они перемещаются со скоростью окружающих их газов;
- в соответствующий зажиганию момент времени, поверхность индивидуальных зарядов мгновенно охватывается пламенем;
- пренебрегаем теплоотдачей, трением газа о стенки камеры, ствола;
- сборка начинает движение после того, как достигается в основной камере равное давлению форсирования;
- горение описывается для зёрен обычным геометрическим законом;

Кинематические переменные поршнем-перегородкой (неинерциальная система отсчета) могут быть выражены через переменные связанные с дном канала установки (инерциальная система отсчета). Обозначим новые параметры в неинерциальной системе отсчета со штрихом, имеем:

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

ω

В этом случае изменятся дифференциальные операторы по новым независимым переменным и они будут выглядеть следующим образом

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

Далее, после опускания штрихов в обозначениях новых переменных, будем иметь следующую систему уравнений:

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

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

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

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

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

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

Понятно, что эту систему можно применять для расчетов как в области I, так и в области II. Представленную систему можно преобразовать в систему уравнений в системе координат, связанных с дном канала ствола (инерциальной системе отсчета).

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 значениях $x = 0$, $t \geq 0$:

$$u = 0.$$

5. При значениях $x = x_1$, $t \geq 0$:

$$\frac{du_1}{dt} = \frac{S}{Q} p_1 - \frac{f_{CB}}{S}, \quad \frac{p_1 - p_2}{Q_\Gamma} \geq \frac{p_3}{q};$$

$$\frac{du_1}{dt} = \frac{S}{Q_\Gamma} p_1 - p_2, \quad \frac{p_1 - p_2}{Q_\Gamma} < \frac{p_3}{q};$$

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

6. При $x = x_2$, $t \geq 0$:

$$u_2 = 0.$$

7. При $x = x_3$, $t \geq 0$:

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

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

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

Расчетная система уравнений для решения приводится к безразмерному виду. За масштабные величины выбраны: $L_{\text{км}} = x_1$, $t_0 = \frac{L_{\text{км}}}{C_0}$

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

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

Обозначены:

x_1 – текущая координата положения поршня - перегородки;

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

w_I, w_{II} – объёмы областей;

$L_{\text{км}}$ – мера длины;

t_0 – мера времени;

p_0 – мера давления;

C_0 – мера скорости.

Безразмерные переменные примут вид:

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

Знак «черта» в дальнейшем у переменных можно убирать. На относительный характер уравнений в системе в дальнейшем будет указывать безразмерное время τ .

Для упрощения записи уравнений введем следующие обозначения:

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

После перехода в системе уравнений, в соответствующих начальных и граничных условиях к безразмерным переменным, с учетом обозначений, получим:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} = 0; \tag{2.1}$$

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

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

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

$$\psi = \chi z + 1 + \lambda z ;$$

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

где $\theta = k - l$, $A = \frac{\Delta L_{KM} C_0}{I_k}$.

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 $x = x_3$, $\tau \geq 0$:

$$\frac{du_3}{dt} = \frac{B}{q} p_3 - \frac{f_{CB}}{S_{KM}} - \frac{dv}{d\tau}, \quad \begin{matrix} 0, & \frac{p_1 - p_2}{Q_\Gamma} \geq \frac{p_3}{q} \\ \frac{p_1 - p_2}{Q_\Gamma} < \frac{p_3}{q}; \end{matrix}$$

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

f_{CB} – по формуле прямого скачка сопротивления воздушного столба.

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

Система представленных уравнений с индивидуальными начальными и граничными условиями для каждой из рассматриваемых областей может быть решена совместным Эйлера-Лагранжевым методом (СЭЛ).

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), уравнения которой записываются в различных индивидуальных для каждой из областей системах координат. В области I для описания проходящих процессов используется система уравнений, записанная в инерциальной системе координат (x, t) . В области II проходящие процессы, описываются системой уравнений, записанной в неинерциальной системе координат, связанной с поршнем-перегородкой (x', t) (Рисунок 1.1).

Представим систему уравнений, описывающую газодинамические процессы в областях I и II в процессе функционирования эстафетной схемы:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$M' = S' n' S'_{02} \rho'_2 \sigma z' a'_1 p' e t' - t'_3 ;$$

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

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

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

Система уравнений (2.2) – (2.8) при значении параметра $N = 0$ описывает в области I, при значении параметра $N = 1$ и замене параметров и переменных в инерциальной системе координат на соответствующие им параметры и переменные в неинерциальной системе координат со штрихом ' ($u \equiv u'$ и т. д.) описывает физические явления в области II, которые происходят уже после начала функционирования дополнительного заряда сборки контейнера (с момента времени t_1).

В системе уравнений (2.2) – (2.8):

- (2.2) – описывает сохранение массы газа;
- (2.3) – описывает сохранение импульса газа;
- (2.4) – описывает сохранение энергии газа;
- (2.5) – описывает сохранение массы твердых частиц;
- (2.6) – описывает сохранение импульса твердых частиц;
- (2.7) – уравнение относительной толщины сгоревшего слоя твердых частиц;
- (2.8) – уравнение состояния для модели гетерогенной среды.

Рассмотрим начальные условия.

Для области I, имеем:

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

$$\psi_H = \frac{\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{\rho_2}}{\frac{f}{p_\Phi} + \alpha - \frac{1}{\rho_2}}; \quad z_H = \frac{2\psi_H}{\kappa_1(1 + \sigma_H)}; \quad \sigma_H = \sqrt{1 + 4 \frac{\lambda_1}{\kappa_1} \psi_H}. \quad (2.9)$$

Для области II, имеем:

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

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

Граничные условия:

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

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

где:

x_{Π} – текущая координата поршня-перегородки в системе координат связанной с инерциальной системой отсчета;

x'_{Π} – текущая координата метаемого элемента в системе координат связанной с неинерциальной системой отсчета;

u_{Π} – скорость перемещения поршня в системе координат связанной с инерциальной системой отсчета;

u'_{Π} – скорость перемещения метаемого элемента в системе координат связанной с неинерциальной системой отсчета.

Значения этих переменных мы определяем с помощью интегрирования уравнений движения полной сборки, а также движения поршня и метаемого 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 пороховых газов на поршень слева (из области I);

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

p_3 – давление пороховых газов 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:

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

Здесь приняты обозначения:

t – время протекания процесса;

x – текущие координаты элементов схемы метания;

u – скорость перемещения газовой фазы;

ω – скорость перемещения конденсированной фазы;

p – давление газа в баллистической системе;

ρ – плотность пороховых газов;

ρ_2 – плотность твердых частиц пороха;

T – расчетная температура пороховых газов;

φ – порозность;

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

S – текущая площадь поперечного сечения канала ствола;

z – относительная толщина сгоревшего свода пороха;

M –массоприход от горения твердых частиц пороха;

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

$\frac{du_{\Pi}}{dt}$ – ускорение поршня-перегородки в инерциальной системе отосчета;

Q – тепловой эффект от горения твердых частиц пороха;

R – универсальная газовая постоянная;

α – коволюм, учитывающий долю молекул в общем объёме;

e_B – полутолщина горящего свода зерна пороха;

a_1, v – коэффициенты в зависимости скорости горения твердых частиц пороха от давления;

n – концентрация твердых частиц в объёме;

Λ_0 – начальный объём частицы пороха;

$\psi(z)$ – относительная часть сгоревшего объёма пороха;

χ_1, λ_1 – коэффициенты формы твердых частиц пороха;

S_{02} – начальная площадь частицы пороха;

$\sigma(z)$ – относительная часть горячей поверхности частицы пороха;

C_x – коэффициент сопротивления движению твердых частиц;

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

Re – число Рейнольдса;

μ – вязкость газовой фазы;

t_3 – момент зажигания твердых частиц пороха дополнительного 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 эстафетной схемы с присоединённым зарядом.

Система уравнений (2.2) – (2.8) решается численно с помощью разностного метода численного расчёта разрывных решений уравнений (метода Годунова) [16], где потоки массы, импульса и энергии на границах расчётных ячеек в уравнениях (2.2) – (2.4) определялись из решения задачи о распаде произвольного разрыва параметров газа на скачке площади сечения [17]. Уравнения (2.12), (2.13) решались методом Эйлера, где давления p_1, p_2, p_3 определялись из решения задачи о распаде произвольного разрыва параметров газа на непроницаемой поверхности.

Начальные условия для области II системы уравнений (2.2) – (2.13) определялись из решения задачи инициирования частиц конденсированной фазы потоком горячих газов из области I через входное отверстие (Рисунок

2.1). Предполагается, что входное отверстие в поршне - перегородке 1 (Рисунок 2.1) вскрывается при достижении некоторого давления форсирования $p_{\Phi 1}$. Ниже приведена система уравнений, записанная в неинерциальной системе отсчета координат (x', t) , связанной с поршнем-перегородкой, которая описывает процессы в регулирующем объеме и области II до момента времени t_1 , когда на поверхности всех частиц области II инициирована химическая реакция. Система уравнений записана в неинерциальной системе отсчета координат (x', t) с началом на входе отверстия в регулирующей объем. Длина регулирующего объема l . По длине регулирующего объема расположены равномерно распределенные боковые отверстия, вскрываемые при давлении форсирования $p_{\Phi 2}$. Частицы конденсированной фазы в области II до момента времени t_1 предполагаются неподвижными относительно поршней.

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

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

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

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

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

В системе уравнений (2.15) – (2.19) уравнение (2.15) – определяет сохранение массы газа, (2.16) – определяет сохранение импульса газа, (2.17) – определяет сохранение энергии газа, (2.18) – определяет относительную толщину прореагировавшего слоя частиц, (2.19) – определяет состояние 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.

Исходные условия:

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

Условия на границах:

условие на границе справа:

$$u' l, t = 0; \quad u' L, t = 0.$$

При входе в объём регулирующий задержку зажигания определяются потоки массы, импульса и энергии перетекающего порохового 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 инициирования зёрен конденсированной фазы производится на основе локальной твердофазной модели зажигания [2].

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

Краевые условия:

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

Химическая реакция на поверхности частицы считается начавшейся, когда температура поверхности превысит некоторую критическую температуру T_z .

Система уравнений (2.15) – (2.21) решается совместно с задачей зажигания (2.22) – (2.23), решаемой в каждой точке расчётной области и позволяет определить картину постепенного инициирования конденсированной фазы в области II. После определения полей температуры, скорости, давления, относительной толщины прореагировавшего слоя частиц на момент времени t_1 , когда химическая реакция инициирована на всех зёрнах к-фазы, эта информация используется в качестве начальных условий для системы уравнений (2.2) – (2.8) (начальные условия (2.10)).

2.4 Разностная схема

В расчётной ячейке, прилегающей к подвижной границе, параметры среды находились по методу С.К. Годунова, применённому для случая подвижных границ ячейки. При увеличении последней ячейки до величины, большей $2h$ (где h - величина расчётной ячейки), проводится её разделение:

выделяется целое число ячеек h и одна ячейка h_N , прилегающая к подвижной границе, удовлетворяющая условию $h \leq h_N < 2h$.

Расчётные области I, II и регулирующего объёма покрывается разностной сеткой с шагами h, h'_1, h_{p_0} соответственно. На начальном этапе при определении начальных условий (2.10) для уравнений (2.2) – (2.8) в области II решается совместно система уравнений (2.2) – (2.8) для области I (при $N = \emptyset$). Затем после инициирования всех частиц к-фазы в области II полученные на этот момент времени поля температуры, скорости газа, давления, относительной толщины прореагировавшего слоя частиц и пористости подставляются в (2.10) и становятся начальными условиями для уравнений (2.2) – (2.8) при $N = 1$. После этого совместно решаются системы уравнений (2.2) – (2.8) при $N = \emptyset$ и при $N = 1$. При этом величина шага в области II выбирается так, 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

$$A_i = \frac{\rho s \varphi}{\rho_2 s (1 - \varphi)} \frac{\rho s \varphi u}{\rho s \varphi E} \quad ;$$

$$B_{i+\frac{1}{2}} = \frac{R_L s_i \varphi_i u_L}{s_i \varphi_i (R_L u_L^2 + p_L)} \frac{R_L p_L}{R_2 W_2 s_{i+\frac{1}{2}}} \frac{1}{R_L} - \alpha \frac{1}{\kappa - 1} + R_L \frac{u_L^2}{2} + p_L \quad ;$$

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

$$(2.25)$$

$$B_{i-\frac{1}{2}} = \frac{R_P s_i \varphi_i u_P}{s_i \varphi_i (R_P u_P^2 + p_P)} R_P p_P \frac{1}{R_P} - \alpha \frac{1}{\kappa - 1} + R_P \frac{u_P^2}{2} + p_P, \\ \frac{R_2 W_2 s_{i-\frac{1}{2}}}{(R_2 W_2^2 s)_{i-\frac{1}{2}}}$$

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:

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

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

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

$$p_i^{n+1} = \frac{E_i^{n+1} - \frac{u_i^{n+1}}{2} \kappa - 1}{\frac{1}{\rho_i^{n+1}} - \alpha};$$

$$\omega_i^{n+1} = \frac{(\rho_2 \omega s (1 - \varphi))_i^{n+1}}{(\rho_2 s (1 - \varphi))_i^{n+1}}.$$

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

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

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

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:

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

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.

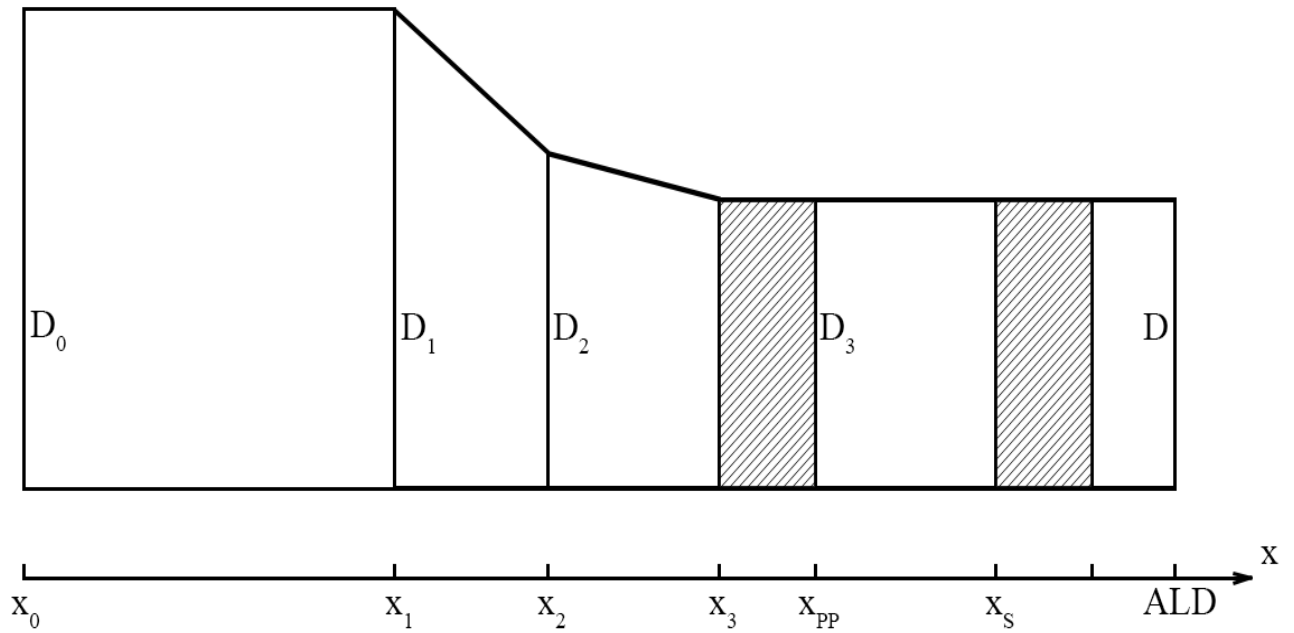


Рисунок 2.3 – Схема расчётных областей с координатами

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 Изучение внутренней баллистики систем малого калибра

3.1 Внутренняя баллистика систем с разделением заряда

Для систем, использующих эстафетную схему метания, выигрыш в начальной скорости реализуется и при применении обычных не высокоэнергетических порохов. При реализации эстафетной схемы выстрела реализуется быстро перемещающаяся вдоль ствола область с высоким давлением.

Необходимо отметить, что применение эстафетной схемы метания убирает недостаток, присущий схемам с последовательным воспламенением частей заряда – уменьшение выигрыша в скорости при конструктивном повышении давления в системе, в связи, например, с модернизацией системы.

3.1.1 Подбор параметров эстафетной схемы

Для повышения эффективности работы систем эстафетной схемы необходимо, чтобы в заданный момент времени, через некоторое время задержки зажигания, воспламенялся бы дополнительный заряд пороховой установки, обеспечивая при этом значительный добавочный подгон ускоряемого элемента. Для пороховых установок серии ППН данные времена задержки зажигания необходимо выбирать в узком диапазоне времени от 1,1 мс до 2,8 мс.

Попробуем оценить характерное время работы в стволе пороховой установки дополнительного заряда. Координата метаемого элемента ППН-23 в момент полного воспламенения дополнительного заряда равна 0,857 м. При общей длине разгонного ствола равной 2 м, элементу остаётся пройти путь равный 1,143 м. Учтём, что средняя скорость элемента на этом оставшемся участке равна 2600 м/с. Таким образом, можно вычислить характерное время

для функционирования дополнительного заряда

$$t = \frac{1,143м}{2600м/с} \approx 0,44 \text{ мс.}$$

В этом случае оправданным является выбор острых порохов типа ВТ 3/1, НБПЛ, П-45 для применения в составе дополнительного заряда. Обеспечению достижения малых времен задержек зажигания воспламеняемого дополнительного заряда способствует реализуемый предварительный прогрев его горячими продуктами сгорания основного заряда. Выбор заданного времени задержки зажигания дополнительного заряда объясняется тем, что в выбранный момент времени, при обязательном учете ограничений наложенных на длину канала ствола, кинетическая энергия поршня становится значительной и может использоваться для перераспределения энергии дополнительного заряда.

Важно, что хороших результатов можно добиваться в случаях, когда после воспламенения дополнительного заряда поршень движется без остановки, сохраняя свою переносную скорость относительно инерциальной системы отсчета, связанной с дном канала метательной системы. Зависимости $U_3=U_3(Qг)$, $U_3=U_3(x_3)$ показали большее влияние массы поршня на баллистические параметры процесса выстрела. Оказалось, что для выбранного значения времени задержки зажигания имеется наилучшее значение веса поршня. При этом значении веса поршня реализуются наперёд заданные значения давления порохового газа дополнительного заряда. Определение наилучших значений задержек зажигания и масс поршней при использовании нетрадиционной эстафетной схемы выстрела возможно при решении задачи оптимизации с учетом заданных ограничений различного типа на параметры системы.

Значения заданных максимальных давлений в системе при заданных весах зарядов можно подбирать при варьировании импульсов порохов зарядов.

Исследования, проведенные для систем малых калибров 23 мм, 34 мм, 42 мм показали необходимость использования времен задержек зажигания 1,10 мс, 1,20 мс, 2,8 мс, для исследованных систем, соответственно. Функционирование

рассмотренных систем, на примере выбранной установки ППН-23, характеризуется хорошей стабильностью.

При выборе веса дополнительного заряда можно в первом приближении исходить из правила, что вес дополнительного заряда должен примерно составлять треть веса основного заряда. Выбор начальной массы поршня проводить сложнее. Масса поршня подбирается при учете альтернативного решения. Причиной является двоякое влияние массы поршня на баллистику выстрела. Дело в том, что повышение массы поршня уменьшает переносную скорость дополнительного заряда, что ведет к общему понижению скорости метания, однако более массивный поршень более инертен к воздействию пороховых газов, образующихся при сгорании дополнительного заряда, и давление в сборке контейнера повышается сильнее, действуя в дальнейшем на метаемый элемент, что способствует достижению большей скорости его метания по сравнению со случаем использования более легкого поршня.

Выбор массы поршня позволяет проводить дополнительное регулирование максимального давления в сборке контейнера. Повышение давления в области дополнительного заряда существенно увеличивает скорость метаемого элемента при выстреле из ПБУ, особенно заметно это увеличение скорости при малых относительных массах метаемых элементов.

3.1.2 Сравнение возможностей классической и предложенной схем выстрела

Необходимо проводить сравнение баллистических возможностей при исследовании систем эстафетной и классической схем выстрела.

Корректным сравнением будем считать сравнение при достижении одинаковых максимальных давлений в камерах установок различных схем выстрела. Улучшение индикаторной диаграммы давления в стволе установки и, благодаря этому, улучшение общей индикаторной диаграммы давления является основным преимуществом предложенной эстафетной схемы.

3.1.2.1 Использование эстафетной схемы выстрела в пороховых установках

В соответствии с рассмотренной физической постановкой задачи для эстафетной схемы, данной в п. 1.6, будем использовать в классических пороховых установках вместо метаемого элемента ускоряемую сборку (поршень-перегородка + дополнительный заряд + метаемый элемент).

Рассмотрим известную пороховую установку ППН-23 (калибра 23 мм). Данные рассматриваемой пороховой установки эстафетной схемы выстрела следующие:

геометрические данные установки

$$\begin{aligned} x_1^0 &= 0,102 \text{ м}, & x_3 &= 0,242 \text{ м}, \\ x_2^0 &= 0,122 \text{ м}, & L_d &= 2,144 \text{ м}, \\ L_{км} = x_1 &= 0,144 \text{ м}, & d_0 &= 0,04624 \text{ м}, \\ x_2 &= 0,147 \text{ м}, & d_1 &= 0,0230 \text{ м}, \end{aligned}$$

данные параметров заряжения

$$\begin{aligned} \omega_I &= 0,160 \text{ кг, ВТ 3/1} & \omega_{II} &= 0,032 \text{ кг, ВТ 3/1} \\ I_{кI} &= 0,38595 \text{ МПа}\cdot\text{с}, & I_{кII} &= 0,10975 \text{ МПа}\cdot\text{с}, \\ f_I &= 0,9996 \text{ МДж/кг}, & f_{II} &= 0,9996 \text{ МДж/кг}, \\ \theta_I &= 0,2, & \theta_{II} &= 0,2, \\ \kappa_I &= 0,8008, & \kappa_{II} &= 1,1531, \\ \lambda_I &= 0,1688, & \lambda_{II} &= -0,1327, \\ \delta_I &= 1,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3, & \delta_{II} &= 1,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3, \\ \alpha_I &= 0,98 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}, & \alpha_{II} &= 0,98 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}, \\ P_{\phi I} &= 1,0 \text{ МПа}, & P_{\phi II} &= 1,0 \text{ МПа}; \\ \theta &= \kappa - 1 \end{aligned}$$

ускоряемые элементы

$$q = 0,010 \text{ кг}; \quad Q_{\Gamma} = 0,010 \text{ кг};$$

Прямая задача внутренней баллистики подобных установок решается с использованием модели газопороховой смеси, представленной в подразделе 2.2. Расчётная начальная скорость метаемой модели массой 10 г равна $V = 4073 \text{ м/с}$. Допускалось, что максимальное давление на дно канала системы не превышает

$P = 1000$ МПа. Полагалось, что в стволе баллистической установки давление ограничено значением $P = 500$ МПа. Расчетные результаты пороховой баллистической установки эстафетной схемы показаны на рисунке 3.1. При классической схеме метания давление на модель не превышает $P = 150$ МПа. Из приведенных графиков рисунка 3.1 следует, что при метании с использованием эстафетной схемы удаётся увеличить давление на модели примерно в три раза. Выбранное время задержки зажигания дополнительного заряда равно $t = 1,1$ мс. К этому времени достигается скорость $V=2$ км/с ускоряемой сборки контейнера, а ускорение сборки начинает падать.

На рисунке показано, что давление в ускоряемой сборке контейнера быстро возрастает от 5 МПа до 500 МПа после воспламенения дополнительного заряда.

Затем происходит разделение ускоряемой сборки контейнера в момент времени, примерно, равный $t = 1,29$ мс. После резкого подъёма давления скорость поршня-перегородки уменьшается, примерно, до значения 1300 м/с. Из-за большого противодействия газов дополнительного полузаряда давление газов на поршень со стороны основного заряда значительно возрастает, останавливая дальнейшее падения скорости поршня-перегородки. Скорость метаемого элемента после разделения ускоряемой сборки контейнера резко подрастает до значения $V=4073$ м/с.

Для сравнения баллистика реализуемой классической схемы выстрела рассчитывалась для пороховой установки ППН-23 при одинаковом максимальном давлении на дно канала. Максимальная расчетная скорость метаемого элемента массой 0,010 кг составила $V=3582$ м/с.

Расчетами получено, что при реализации эстафетной схемы выстрела получен выигрыш в начальной скорости метаемого элемента при одинаковом максимальном давлении на дно канала, который составил 13,7%.

При учете влияния сопротивления воздушного столба в канале ствола системы движению метаемого элемента по формуле прямого скачка уплотнения расчетами получено уменьшение начальной скорости метаемого

элемента на 5,1% для классической схемы выстрела и уменьшение скорости на 2,4% для эстафетной схемы выстрела.

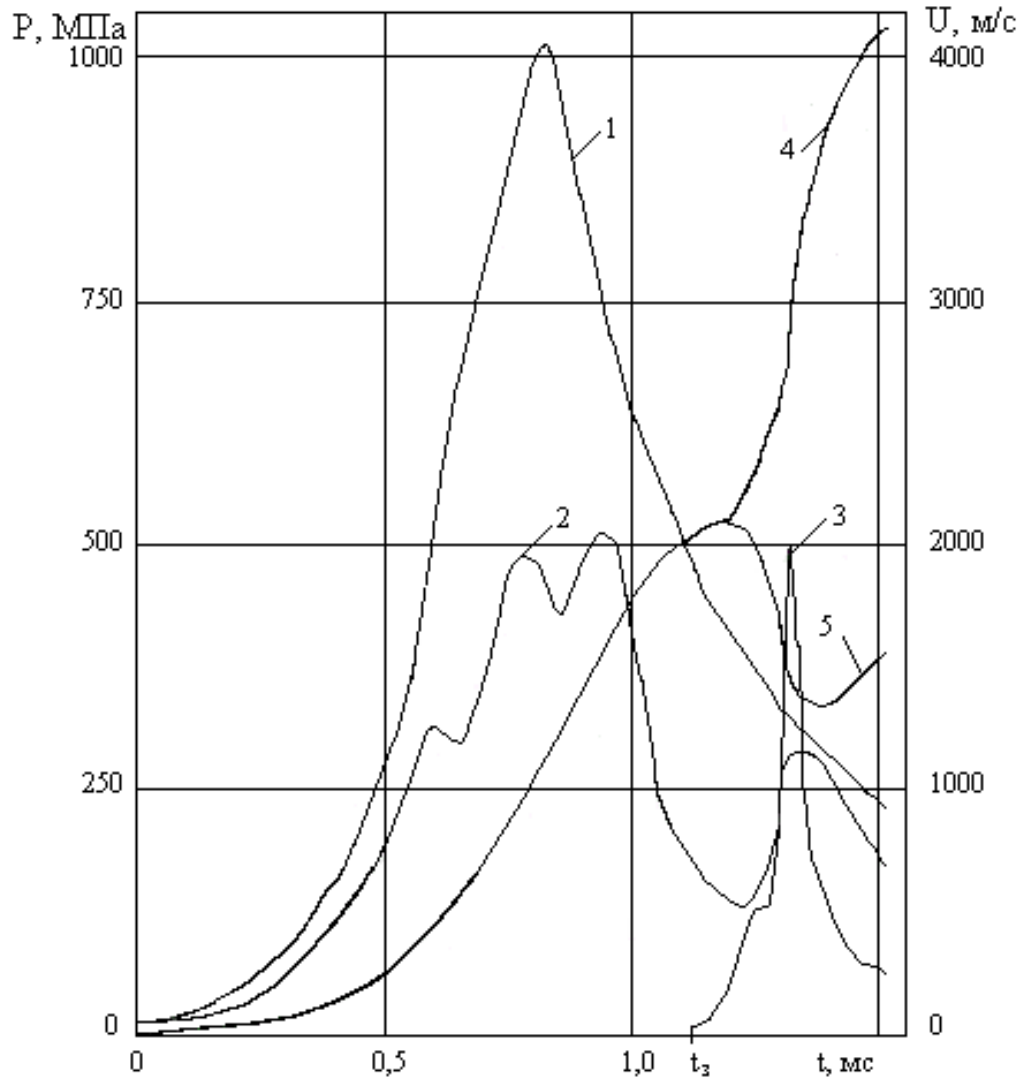


Рисунок 3.1. Баллистика выстрела эстафетной схемы системы калибра 23 мм

1 – зависимость давления на дно канала от времени; 2 - зависимость давления на дно поршня-перегородки от времени ; 3 - зависимость давления на метаемый элемент от времени ; 4 – зависимость скорости метаемого элемента от времени; 5 – зависимость скорости поршня-перегородки от времени.

Баллистические возможности эстафетной схемы выстрела исследовались с точки зрения достижения максимальных скоростей метаемых элементов на модельной пороховой баллистической установке ППН-42, калибра 42 мм.

Данные для расчёта системы эстафетной схемы выстрела выбирались следующими:

$$x_1^0 = 0,200 \text{ м}, \quad d_0 = 0,084 \text{ м},$$

$$x_2^0 = 0,325 \text{ м}, \quad d_1 = 0,042 \text{ м},$$

$$x_1 = 0,325 \text{ м},$$

$$x_2 = 0,330 \text{ м},$$

$$x_3 = 0,600 \text{ м},$$

$$L_d = 4,025 \text{ м},$$

данные параметров заряжения

$$\omega_1 = 1,200 \text{ кг}, \quad \omega_2 = 0,300 \text{ кг}.$$

ускоряемые элементы

$$q = 0,150 \text{ кг}; \quad 0,065 \text{ кг}$$

$$Q_{\Gamma} = 0,150 \text{ кг}; \quad 0,065 \text{ кг}$$

Основной заряд выбирался - порох 7/7, дополнительный - порох ВТ 3/1 для метаемых элементов массой 0,150 кг.

Основной заряд выбирался - порох 7/7 ($I_{к1}=0,673 \text{ МПа}\cdot\text{с}$), дополнительный - порох П-45 ($I_{к11}=0,1098 \text{ МПа}\cdot\text{с}$) для метаемых элементов массой 0,065 кг.

Расчетные результаты по модельной системе калибра 42 мм для двух масс метаемых элементов и модельной пороховой установке ППН-34, калибра 34 мм, с ускоряемым контейнером приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Изучение баллистических возможностей установок выстрела
эстафетной схемы

Система	Калибр мм	ω_I кг	ω_{II} кг	q кг	Q_{Γ} кг	t_1 мс	$P_0 \max$ МПа	$P_3 \max$ МПа	U_d м/с	$U_{dш}$ м/с
ППН-34	0,034	0,27	0,065	0,030	0,030	1,20	1000	500	3935	3396
ППН-42	0,042	1,20	0,300	0,150	0,150	2,80	800,9	672,5	3444	–
ППН-42	0,042	1,20	0,300	0,065	0,065	2,80	794,1	845,2	4567	–

Представленные результаты показывают, что модельная пороховая установка ППН-34 обеспечивает достижение скорости метания элемента при использовании ЭСВ на 15,8% выше достигаемой расчетной при классической схеме метания. Модельные эстафетные системы калибра 42 мм обеспечивают большой выигрыш в скорости, вследствие более высокого допустимого максимального давления в области дополнительного заряда.

За счет кратковременного импульса давления процесс подгона метаемого элемента на модельной системе ППН-42 с элементом массой $q=65$ г. может быть достаточно эффективен. Рассмотрим график $P_3 = P_3(x_3)$ представленный на рисунке 3.2. Продолжительность всплеска давления выше 500 МПа по времени $t = 41$ мкс.

Учтем, что скорость метаемого элемента, как и скорость элементов дополнительного заряда, к моменту подгона составляет $V = 2700$ м/с. Получается, что за время существенного подгона метаемый элемент прошёл 0,09 м. Повышение скорость элемента при этом составляет 1200 м/с. Отсюда следует, что эффективный подгон модели может быть осуществлён без ущерба прочностным свойствам ствола.

При этом, коэффициент перевода расчетного газодинамического давления в практическое крешерное составляет 1,24. Для рассмотренной модельной системы калибра 42 мм расчётная скорость метаемого элемента составила $V = 4740$ м/с, в то время как теоретическая максимально достижимая скорость [1]

при максимальном заряде равняется 4,9 км/с. Это факт является поводом для дальнейшего исследования внутрибаллистических параметров систем ЭСВ.

Проанализируем внутреннюю баллистику модельной системы эстафетной схемы метания с практически реализуемым контейнером. В начале необходимо выбрать параметры контейнера из условий его функционирования.

Можно проверить баллистические возможности систем эстафетной схемы на примере модельной пороховой установки ППН-23 с массой поршня-перегородки и воспламенительной трубки $Q_{\Gamma} = 52$ г. Будем считать, что

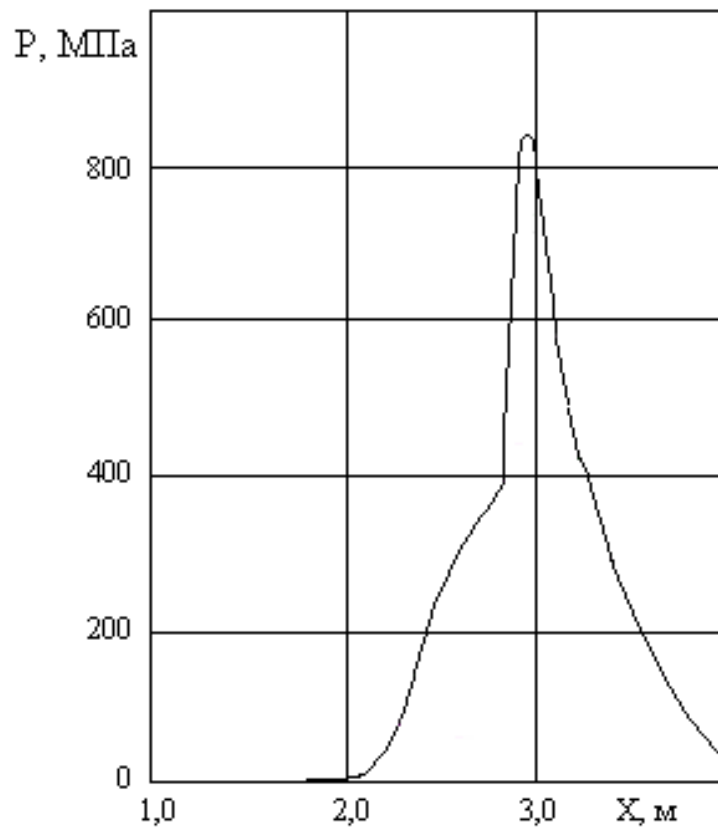


Рисунок 3.2. График давления на модель от пути по каналу модельной системы при ВЭС

такая масса элемента сборки-контейнера позволит изготовить элемент ВЭС обеспечивающий возникающие напряжения при метании.

Выясним, как при расчетных максимальных давлениях в пороховой баллистической установке использование новой сборки-контейнера повлияет на толщину порохов зарядов в обеих камерах. Оказывается, что в случае предполагаемого к использованию более тяжелого контейнера порох более “толстый”.

Проведённые расчеты баллистических параметров в модельной установке с тяжелым контейнером с учетом принятых ограничениях на величины максимальных давлений при использовании относительных весов метаемых элементов $C_q = 1, 2, 3$ представлены на рисунках 3.3, 3.4, 3.5.

Графики зависимостей давлений у дна каморы, справа и слева от поршня и на снаряде, а также скоростей поршня и снаряда от безразмерной координаты метаемого элемента показывают, как меняется характер движения сборки контейнера с увеличением массы метаемого элемента. Следует отметить, что в случае элемента с $C_q=1$, давление на поршне контейнера не имеет второго максимума, так как модель быстро уходит по стволу. Для больших $C_q= 2, 3$ посланная от поршня к модели волна сжатия отражается частично моделью и вызывает повторный всплеск давления на поршне, при $C_q = 3$ интенсивности всплесков давления на поршне одинаковы.

В таблице 3.2 приведены результаты сравнения предложенного способа метания с классической схемой выстрела для $C_q = 1 \div 3$ при одинаковом удлинении ствола.

Таблица 3.2

Повышение начальной скорости модели для классической и предложенной схем выстрела с удлинением ствола

q г	V м/с	$\frac{\Delta V}{V} \%$	V _L м/с	$\frac{\Delta V_L}{V_L} \%$	V _к м/с	L _{СТ} дм
12	3430,4	4,4	3232,9	10,8	3582,0	21,79
24	2865,8	0,5	2842,1	9,6	3114,9	28,08

36	2462,4	0,07	2518,7	7,2	2700,0	31,00
----	--------	------	--------	-----	--------	-------

Здесь V – расчетная начальная скорость метаемого элемента при классическом выстреле, $\frac{\Delta V}{V}\%$ – прирост скорости за счёт использования контейнера, при обычной

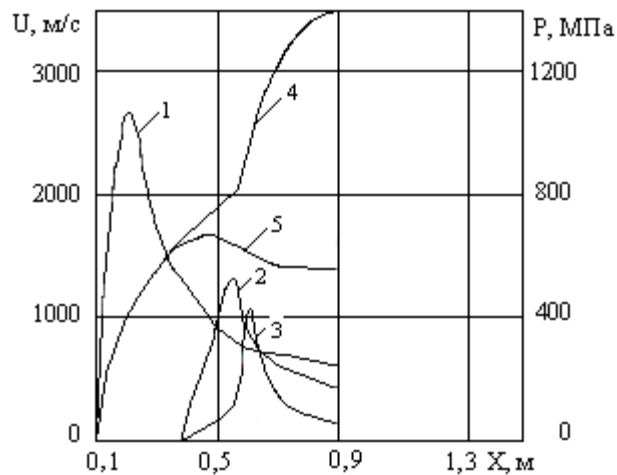


Рисунок 3.3. Расчет ВЭС с метаемой моделью ($Cq=1$): 1 – зависимость давления на дно ствола; 2 – зависимость давления на дно контейнера; 3 – зависимость давление на метаемый элемент; 4 – зависимость скорости метаемого элемента; 5 – зависимость скорости контейнера.

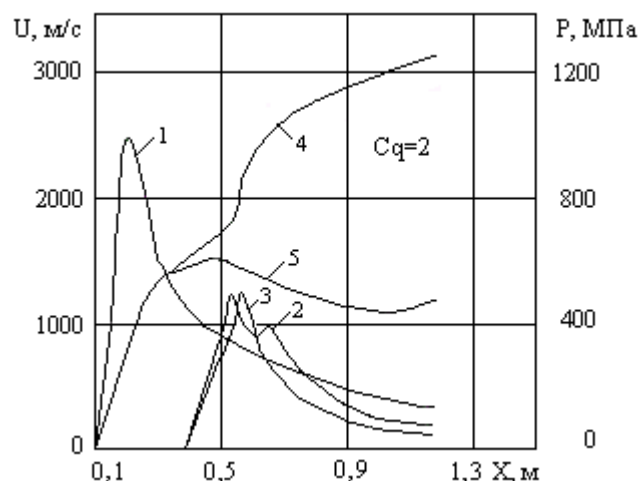


Рисунок 3.4. Расчет ВЭС с метаемой моделью ($Cq=2$): 1 – зависимость давления на дно ствола; 2 – зависимость давления на дно контейнера; 3 – зависимость давление на метаемый элемент; 4 – зависимость скорости метаемого элемента; 5 – зависимость скорости контейнера.

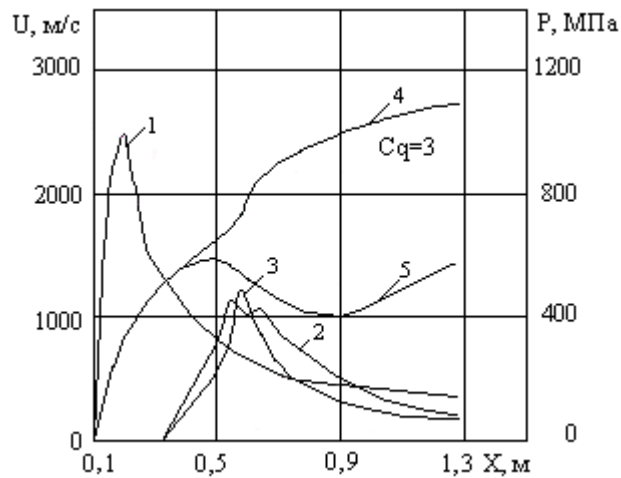


Рисунок 3.5. Расчет ВЭС с метаемой моделью ($C_q=3$): 1 – зависимость давления на дно ствола; 2 – зависимость давления на дно контейнера; 3 – зависимость давление на метаемый элемент; 4 – зависимость скорости метаемого элемента; 5 – зависимость скорости контейнера.

длине ствола L_{CT} ; $V_L, \frac{\Delta V_L}{V_L} \%$ – параметры при изменяемом значении L_{CT} .

Длина разгонного ствола незначительно влияет на повышение начальной скорости при классической схеме выстрела, тогда как в случае эстафетного выстрела начальная скорость метаемого элемента увеличивается значительно, что говорит о реализации преимущества предложенной схемы выстрела. Метание с использованием классической схемы имеет большую зависимость от сопротивления воздушного столба. При расчетах, представленных в таблице 1.2, длина разгонного ствола выбиралась так, чтобы давление на снаряде в дульный момент времени P_l , было порядка 50 МПа, так как вследствие противодействия при меньшем P_l ускорение метаемого элемента на дульном срезе незначительно.

Преимущества эстафетной схемы метания можно использовать более полно, если учесть кратковременность всплеска давления в контейнере, длящегося примерно 100 мкс, вследствие чего характер нагружения ствола является динамичным, и расчет на прочность по параметру μ^G ствола

пороховой установки допускает давление до 2 ГПа. При этом конструкция контейнера не изменяется, так как баллистика основной камеры останется прежней, а увеличение давления в контейнере к прочности воспламенительного устройства не предъявляет дополнительных требований ввиду того, что основной силой, действующей на перфорированную трубку при разгоне, является инерция модели. После разделения контейнера она исчезает, что значительно уменьшает напряжения в материале трубки.

Повышение начальной скорости модели при $Cq = 1$ по сравнению с расчетной скоростью при классической схеме достигает примерно 20%, что говорит о перспективе использования ускоряемого контейнера в реальных пороховых установках. Исходя из этого, показано, что системы эстафетной схемы выстрела могут реализовать существенный выигрыш в скорости метания по сравнению со случаем использования классической схемы выстрела, а также при применении обычных штатных порохов.

3.2 Баллистика системы с учетом сопротивления воздушного столба

Скорости метаемых элементов можно повышать за счет деления заряда баллистической системы на несколько зарядов – эстафетная схема. Схема метания с делением заряда на два полузаряда представлена в [40]. Работу систем рассмотренной схемы можно обеспечить за счёт реализации зажигания частей общего разделённого заряда в строго определённые моменты времени (задержки зажигания) после зажигания основной части заряда, например, за счёт воспламенения дополнительного полузаряда иницирующими газами, перетекающими из камеры основного заряда, и т.д.

В процессе выстрела в движение приходит сборка контейнера, состоящая из поршня-перегородки с отверстием, дополнительного полузаряда, расположенного в области 1, и метаемого элемента. Дополнительный полузаряд воспламеняется через заданное время задержки зажигания после начала движения сборки контейнера. При этом давление перед поршнем-

перегородкой становится более высоким, чем давление за поршнем-перегородкой, сборка разделяется, и в канале системы малого калибра возникает сложная волновая картина, которая приводит к перераспределению энергии на повышение скорости метаемого элемента. Поршень-перегородка притормаживается, метаемый элемент продолжает далее самостоятельное движение по каналу, приобретая на дульном срезе более высокую скорость по сравнению со скоростью, реализуемой при классической схеме метания.

Рассмотрим применение эстафетной схемы в установке малого калибра 30 мм. Эстафетная схема представлена на рисунке 3.6.

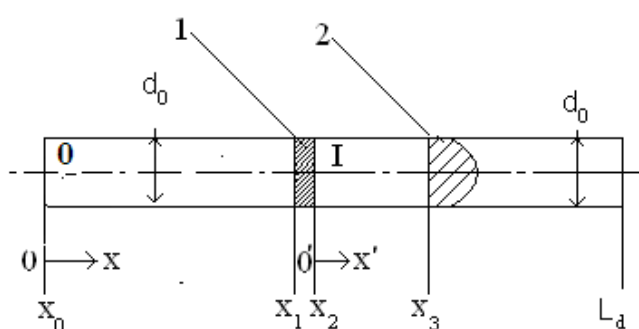


Рисунок 3.6. Схема метания: 0, I – области, где располагаются части заряда; 1 – перегородка; 2 – метаемый элемент; d_0 – диаметр цилиндрического канала системы; L_d – длина канала; I – камера основного заряда; II – область присоединенного заряда.

Проведенный теоретический анализ эффективности эстафетной схемы по модели, представленной в [39], показал, что при неизменном максимальном давлении на дно канала ствола при использовании эстафетной схемы возможно повышение скорости метаемого элемента для системы среднего калибра.

Расчеты для системы малого калибра проводились по модели механики гетерогенных сред [39, 42, 31]. В каждой расчетной области использовалась индивидуальная система координат: в области 0 – инерциальная система координат OX , в области I – неинерциальная система координат $O'X'$.

Считалось, что допустимое максимальное давление на дно канала (область I) не превышает 420 МПа. Импульсы частей заряда подбирались под заданное

максимальное давление в системе малого калибра. Решение задачи проводилось методом распада произвольного разрыва [19].

При расчёте параметров системы эстафетной схемы проводился учет противодействия воздушного столба по формуле прямого скачка уплотнения [43].

$$p_{np} = p_n \left(1 + \frac{k(k+1)}{4} \cdot \frac{v_{сн}^2}{c_г^2} + \frac{kv_{сн}}{c_г} \sqrt{1 + \frac{(k+1)v_{сн}^2}{16c_г^2}} \right) \quad (1)$$

Здесь:

p_{np} – противодействие воздушного столба;

p_n – начальное давление воздуха в канале ствола;

k – показатель адиабаты для воздуха;

$v_{сн}$ – скорость пули или дробового заряда

Скорость звука в воздухе:

$$c_г = \sqrt{\frac{k_B p_n}{\rho_г}}, \quad \rho_г - \text{плотность воздуха} \quad (2)$$

Результаты расчета приведены на рис.2.

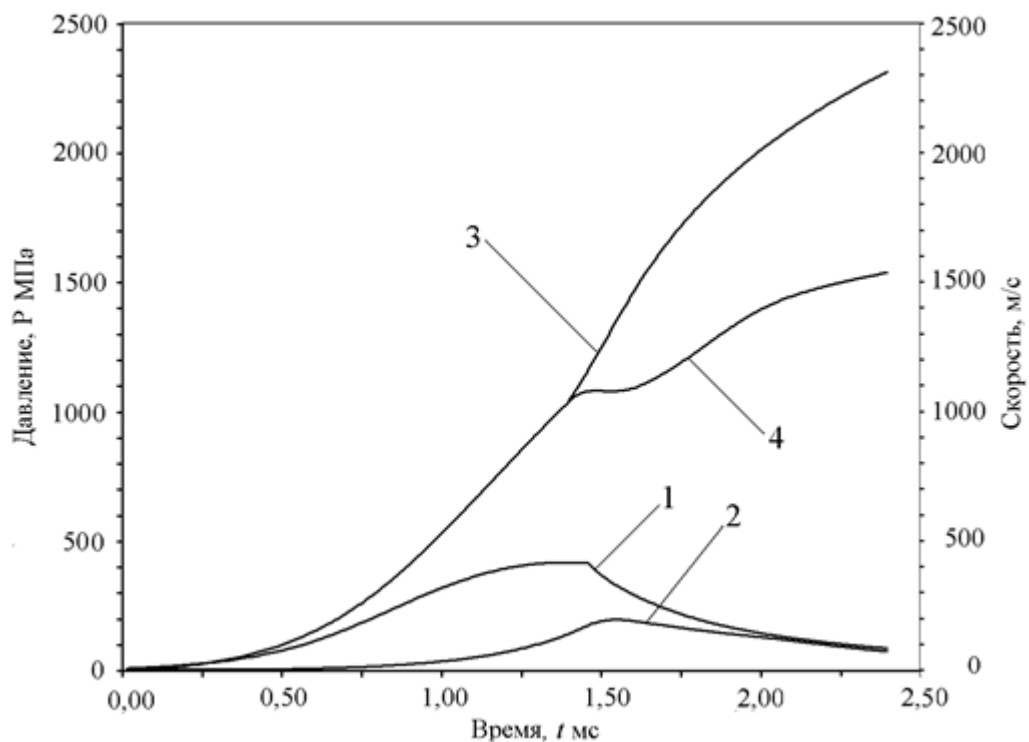


Рисунок 3.7. Расчетная баллистика системы эстафетной схемы. 1 – зависимость давления на дно канала от времени; 2 - зависимость давления перед подвижной перегородкой от времени; 3 - зависимость скорости метаемого элемента от времени; 4 - зависимость скорости перегородки от времени;

Результаты расчетов системы малого калибра показали, что при метании элемента с $C_q = 1,85 \text{ Г/см}^3$ возможно достижение начальных скоростей метания выше 2300 м/с. Полученный результат интересен для проведения различных исследований внешней баллистики.

3.3 Баллистика системы с разделением заряда на три части

Дальнейший интерес представляет изучение нетрадиционной схемы ВЭС при использовании двух камер подгона [40] с целью дополнительного повышения скоростей метаемых элементов. Части общего заряда разделённые поршнями-перегородками представляют собой камеры, последовательно включающиеся в работу, рисунок 3.8.



Рисунок 3.8. Метательная система с разделением заряда на три части. I- камера основной части заряда, II- камера первой дополнительной части заряда, III- камера второй дополнительной части заряда

Камеры первой и второй дополнительных частей заряда начинают движение одновременно с метаемым элементом и включаются в работу, каждая со своим временем зажигания, или со своей координатой, задержки зажигания после срабатывания основной части заряда в камере I.

Изучение баллистических возможностей системы метания с двумя камерами подгона необходимо начинать с решения прямой задачи внутренней баллистики для баллистической системы с разделением заряда на три части. Прямая задача внутренней баллистики системы метания с двумя камерами подгона при обычных допущениях модели газопороховой смеси была решена [40].

В [40] решается задача о движении метаемого элемента под действием пороховых газов, образующихся при постепенном горении пороха в области основного заряда и камерах подгона, рисунок 3.8. Расчёт параметров во второй области или первой камере подгона начинается после включения её в работу через определённый промежуток времени, называемый временем задержки зажигания t_3 , или после прохождения сборкой из двух камер определённого пути x_3 по каналу после воспламенения пороха в первой области (основной камере). Расчёт параметров в третьей области (второй камере подгона) начинается после включения её в работу с заданной задержкой t_{31} , или после прохождения второй камерой подгона определённого пути x_{31} по каналу после воспламенения пороха во второй области (первой камере подгона). В этом случае эффективность баллистической системы повышается за счет увеличения КПД использования зарядов в каждой добавленной области.

Массу представленных на рисунок 3.8 поршней можно произвольно варьировать при проведении расчётов. Расчётная схема ВЭС для двух камер подгона приведена на рисунок 3.9.

После перехода к относительным переменным и ввода для простоты следующих замен: $\rho S \rightarrow \rho$, $\rho u S \rightarrow M$, $\rho \varepsilon S \rightarrow \varepsilon$; система уравнений, записанная для удобства проведения расчётов в неинерциальной системе координат, связанной со вторым поршнем, в безразмерном виде выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} &= 0, \\
\frac{\partial M}{\partial \tau} + \frac{\partial M u}{\partial x} + S \frac{\partial p}{\partial x} &= -N_1 \rho \frac{dv}{d\tau} - N_2 \rho \frac{dv_1}{d\tau}, \\
\frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} + \frac{\partial \varepsilon u}{\partial x} + p \frac{\partial S u}{\partial x} &= \rho \Pi \left(\frac{\partial \psi}{\partial \tau} + u \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) - N_1 p v \frac{dS}{dx} - N_2 p v_1 \frac{dS}{dx}, \\
\frac{\partial \psi}{\partial \tau} + u \frac{\partial \psi}{\partial x} &= \sqrt{\chi^2 + 4\chi\lambda\psi A}, \\
\psi &= xz(1 + \lambda z), \\
\varepsilon &= \frac{p\rho}{\theta} \left(\frac{S}{\rho} - \frac{1-\psi}{\delta} - \alpha\psi \right),
\end{aligned} \tag{3.1}$$

где $\theta = k-1$, $A = \frac{\Delta L_{км} c_0}{I_k}$.

Здесь обозначены: ρ - плотность, s - площадь, u - скорость, p - давление, ε - внутренняя энергия газопороховой смеси, $\Pi = f/(k-1)$ - потенциал состава, f - сила состава, k - показатель адиабаты, ψ - абсолютная часть сгоревшего свода состава, z - относительная часть сгоревшего свода состава, χ и λ - коэффициенты формы состава, I_k - конечный импульс давления, δ - плотность состава, α - коволюм, v - скорость неинерциальной системы координат $0'-x'$, v_1 - скорость неинерциальной системы координат $0''-x''$.

Эта система используется для расчета в трёх областях. Как частный случай из нее можно легко получить уравнения в инерциальной системе координат при $N_1 = N_2 = 0$. В неинерциальной системе координат связанной с первым поршнем – при значении коэффициентов $N_1=1$, $N_2 = 0$ (для расчёта параметров в области II). В неинерциальной системе координат связанной со вторым поршнем – при значении коэффициентов $N_1=1$, $N_2 = 1$ (для расчёта параметров в области III). Расчёты проводятся при соответствующих начальных и граничных условиях.

При $\tau=0$, $0 \leq x \leq x_1$,

$$u_1 = 0, \quad \rho_1 = \Delta_1 S, \quad p_1 = p_\Phi, \quad \psi_1 = \frac{\frac{1}{\Delta_1} - \frac{1}{\delta_1}}{\frac{f_1}{p_1} + \alpha_1 - \frac{1}{\delta_1}}.$$

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 $\tau = t_3$, $x_2 \leq x \leq x_3$,

$$u_{II} = 0, \quad \rho_{II} = \Delta_{II} S, \quad M_{II} = \rho_{II} u_{II}, \quad p_{II} = p_B, \quad \psi_{II} = \frac{\frac{1}{\Delta_{II}} - \frac{1}{\delta_{II}}}{\frac{f_{II}}{p_{II}} + \alpha_{II} - \frac{1}{\delta_{II}}}. \quad (3.2)$$

4. При $\tau = 0$, $x_4 \leq x \leq x_5$,

$$u_{III} = 0, \quad \rho_{III} = \Delta_{III} S, \quad p_{III} = p_a, \quad \Psi_{III} = 0.$$

5. При $\tau = t_{31}$, $x_4 \leq x \leq x_5$,

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

6. При $x=0$, $\tau \geq 0$; $u=0$.

7. При $x=x_1$, $\tau \geq 0$,

$$\frac{du_1}{d\tau} = \begin{cases} \frac{B}{Q} \left(Sp_1 - \frac{f_{CB}}{S_{KH}} \right), & \text{если } \frac{p_1 - p_2}{Q_\Gamma} \geq \frac{p_3}{Q_1} \\ \frac{B}{Q_\Gamma} (p_1 - p_2), & \text{если } \frac{p_1 - p_2}{Q_\Gamma} < \frac{p_3}{Q_1} \end{cases},$$

$$\frac{d\nu}{d\tau} = \frac{du_1}{d\tau}.$$

8. При $x=x_2$, $\tau \geq 0$; $u_2=0$.

9. При $x=x_3$, $\tau \geq 0$,

$$\frac{du_3}{d\tau} = \begin{cases} 0, & \text{если } \frac{p_1 - p_2}{Q_\Gamma} \geq \frac{p_3}{Q_1} \\ \frac{B}{Q_1} \left(p_3 - \frac{f_{CB}}{S_{KM}} \right) - \frac{d\nu}{d\tau}, & \text{если } \frac{p_3 - p_4}{Q_{\Gamma 1}} \geq \frac{p_5}{q} \\ \frac{B}{Q_{\Gamma 1}} (p_3 - p_4) - \frac{d\nu}{d\tau}, & \text{если } \frac{p_3 - p_4}{Q_{\Gamma 1}} < \frac{p_5}{q} \end{cases},$$

$$\frac{d\nu_1}{d\tau} = \frac{du_3}{d\tau}.$$

10. При $x=x_4$, $\tau \geq 0$; $u_4=0$.

11. При $x=x_5$, $\tau \geq 0$,

$$\frac{du_5}{d\tau} = \begin{cases} 0, & \text{если } \frac{p_3 - p_4}{Q_{Г1}} \geq \frac{p_5}{q}, \\ \frac{B}{q} \left(p_5 - \frac{f_{св}}{S_{кн}} \right) - \frac{dv}{d\tau} - \frac{dv_1}{d\tau}, & \text{если } \frac{p_3 - p_4}{Q_{Г1}} < \frac{p_5}{q}, \end{cases}$$

$$B = S_{кн} \Delta L_{кн},$$

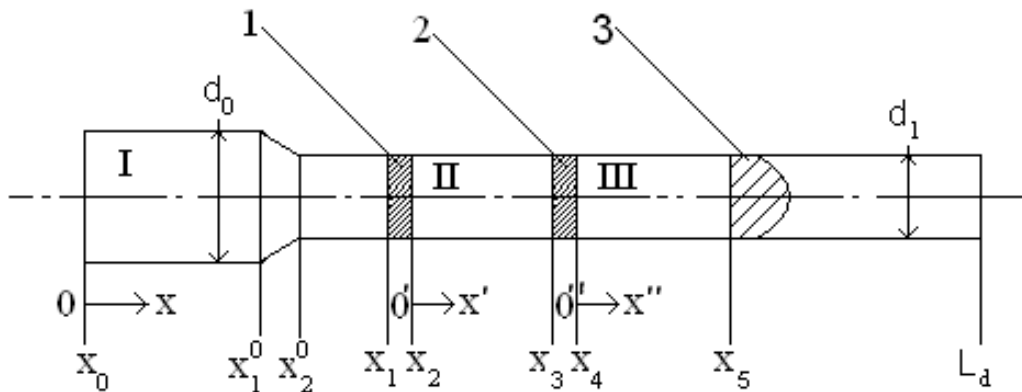


Рисунок 3.9. Схема ВЭС с двумя камерами подгона:

1 – первый поршень; 2 – второй поршень; 3 – метаемый элемент.

Проведенные расчеты показали, что по сравнению с разделением заряда на 2 части рассматриваемый случай деления заряда на 3 части при прочих равных условиях позволяет повысить скорость метаемого элемента примерно на 8% дополнительно.

3.4 Баллистика системы с выдвигающимся зарядом

Преимущества использования эстафетной схемы на системах малого калибра были разобраны в 3.1 – 3.3, 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 рисунках, отображающих расчётную схему установки эстафетной схемы, 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 **Ошибка! Источник ссылки не найден..**

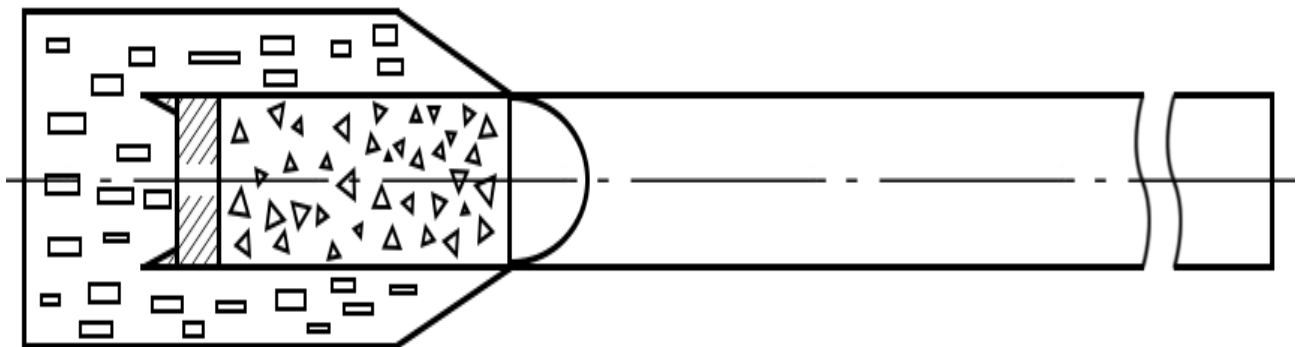


Рисунок 3.10. Графическое представление схемы с выдвигающимся зарядом.

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 примерно 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 используемым 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.

3.4.1 Описание схемы с выдвигающимся зарядом

Для систем имеющих цилиндро – коническую камеру в случае использования унитарного заряжения сложно реализовать «эстафетную схему» метания. При этом необходимо создать математическую модель, учитывающую выдвигание блока дополнительный заряд + метаемый элемент.

Эффективность схемы бесспорна при метании элементов с реализацией малого времени задержки зажигания. В этом случае максимумы при функционировании разделенного заряда накладываются с некоторым запозданием друг на друга. Реализуется двугорбая кривая, позволяющая обеспечивать повышение начальных скоростей метания относительно тяжелых метаемых элементов.

Направление данного исследования является перспективным, ибо совершенствование схем метания без внесения кардинальных изменений в конструкции самих пушек позволяет экономить большие средства. Внутрибаллистические характеристики орудия могут значительно улучшиться при использовании боеприпасов, использующих принцип модернизированного эстафетного метания. Поэтому в дальнейшем может проводиться обеспечение проведения исследовательских работ по улучшению характеристик баллистических систем малого калибра.

Для изучения применения модификации эстафетной схемы была использована система 2А42 калибра 30 мм.

Расчетная схема при этом будет выглядеть в соответствии с Рисунком 3.11.

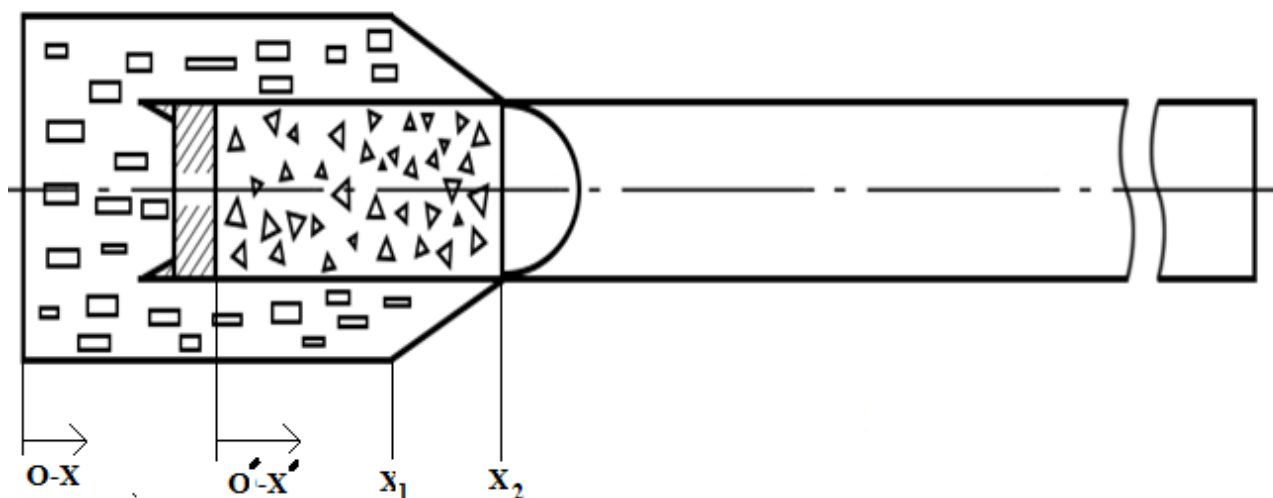


Рисунок 3.11 – Расчетная схема системы с выдвигающимся зарядом

Расчеты проводились по отлаженной программе на основе модели гетерогенных сред.

Сравнительные расчеты проводились на модельной системе по данным 2А42 с объёмом камеры $W_0 = 0,117 \text{ дм}^3$ для варианта классической схемы выстрела и суммарным объёмом камеры $W_0 = 0,113 \text{ дм}^3$ для варианта схемы с выдвижением заряда.

Для варианта классической схемы выстрела была получена скорость $V = 1120 \text{ м/с}$ метаемого элемента «Кернер» $q = 304 \text{ Г}$ при $P_{\text{max}} = 513 \text{ МПа}$.

Это давление несколько выше штатного в силу несогласованности данных по применяемому энергетическому составу.

При счёте модельной системы 2А42 с выдвигающимся зарядом при использовании подобранных данных по применяемому энергетическому составу из расчёта классики получена скорость $V = 1314 \text{ м/с}$ того же самого метаемого элемента.

Таким образом реализован выигрыш примерно 17% в скорости метания элемента «Кернер» с расчётным давлением на дно канала $P_{\text{max}} = 586 \text{ МПа}$.

Суммарная масса заряда $\omega = 155 \text{ Г}$.

При более низком давлении в камере 2А42 по сравнению со штатным, $P_{\max} = 464$ МПа, расчетная скорость составила $V = 1222$ м/с, что примерно на 9% выше штатной скорости при классической схеме метания.

Т.о. при использовании модернизированной «эстафетной» схемы на модельной системе 2А42 получен расчетный выигрыш от 9% до 17% по сравнению с расчетным результатом для классической схемы метания.

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 по сравнению с описанием термодинамических процессов, поэтому использование описания именно газодинамических процессов считается более приемлемым для использования в математической модели.

Анализ существующих схем метания, классической и нетрадиционных, показал, что без внесения модификаций в конструкцию унитарного заряда 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 изменение математической модели, создание схемы с выдвигающимся зарядом, сохранившей принцип использования двух камер с двумя зарядами, с обеспеченной задержкой зажигания второго полужаряда.

Представлены результаты вычислений, полученных после работы данной реализации, для нескольких конфигураций систем малого калибра: Прирост скорости в данном случае составил в среднем 9%. Проведённое сравнение результатов работы схем метания, классической и эстафетной, показало прирост скорости метаемого элемента порядка 17%.

С научной точки зрения, показано, как применение компьютерных моделей энергетических процессов (в данном контексте энергетических

процессов во внутренней баллистике) помогает повышать баллистические характеристики метательных систем.

Список использованных источников

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. Нигматулин, Р. И. Динамика многофазных сред [Текст]: учебник / Р.И. Нигматулин. — 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.
42. Рахматуллин Х.А. Основы газодинамики взаимопроникающих движений сжимаемых сред [Текст] // ПММ. –1956.—Т.20. –В.1.—С.184-195.
43. Русяк И.Г. Внутрикамерные гетерогенные процессы в ствольных системах [Текст] / И.Г. Русяк, В.М. Ушаков.// Екатеринбург: УрО РАН, 2001.—459с.