

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Тольяттинский государственный университет»

Институт математики, физики и информационных технологий

(наименование института полностью)

Кафедра «Прикладная математика и информатика»

(наименование кафедры)

01.04.02 ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА И ИНФОРМАТИКА

(код и наименование направления подготовки)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

(направленность (профиль))

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

на тему Моделирование внутренней баллистики охотничьих систем

эстафетной схемы

Студент

М. Д. Кудряшов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

А. И. Сафронов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

руководитель

Руководитель

магистерской программы

д.ф.-м.н., доцент, С.В. Талалов

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой к.т.н., доцент кафедры ПМИ, А.В. Очеповский

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Тольятти, 2019 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 Теоретическое рассмотрение внутренней баллистики и различных схем метания.....	8
1.1 Предмет и задачи внутренней баллистики.....	8
1.2 Описание традиционной схемы выстрела.....	10
1.3 Исследование некоторых нетрадиционных схем выстрела .....	12
1.4 Развитие теории движения многофазных гетерогенных сред и моделирование внутрикамерных процессов .....	15
1.5 Анализ возможностей эстафетной схемы .....	17
ГЛАВА 2 Математическая модель для схемы с разделением заряда .....	20
2.1 Процесс работы системы с разделением заряда .....	20
2.2 Вывод уравнений равновесия гетерогенной двухфазной реагирующей смеси в канале переменного сечения .....	22
2.3 Конкретизация функций массового и силового взаимодействия гетерогенной системы: пороховые газы – несгоревшие пороховые элементы	29
2.4 Расчет шага .....	30
ГЛАВА 3 Математические модели стрелковых метательных систем для схемы с разделением заряда.....	33
3.1 Баллистическая система ВПО-208 с разделением заряда.....	33
3.2 Двухскоростная среда.....	36
3.3 Баллистическая система МР – 153 с разделением заряда.....	37
3.4 Использование Метода Годунова для математического моделирования производительности баллистических систем.....	41
ГЛАВА 4 Компьютерное моделирование схемы с разделением заряда.....	49

4.1	Анализ программных средств для реализации .....	49
4.2	Разработка компьютерной модели схемы с разделением заряда.....	52
4.3	Результаты работы компьютерной модели .....	57
ГЛАВА 5	Итоговый анализ результатов и способов дальнейшего улучшения системы.....	61
5.1	Анализ результатов выполненного исследования.....	61
5.2	Способы дальнейшего улучшение системы с разделением заряда ...	67
5.3	Рекомендации практического характера .....	68
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	70
	СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	73

## ВВЕДЕНИЕ

С помощью математического моделирования можно изменить представление о всевозможных наблюдаемых процессах, в том числе это может быть выстрел баллистической системы, например, артиллерийский выстрел. При моделировании выстрела могут учитываться такие параметры, как:

- скорострельность
- максимальная дальность поражения
- начальная скорость
- и т.д.

Для того, чтобы получить наилучший прирост параметров, указанных выше, необходимо построить математическую модель выстрела, которая поможет проводить вычислительные эксперименты с целью подбора оптимального состава, общего объема заряда, длины области и т.п.

Существенно повысить скорость получения необходимых результатов можно при помощи использования современных рабочих станций, которые в свою очередь обладают высокими вычислительными мощностями и допускают меньше погрешностей что позволяет получить более высокую точность вычислений, чем при вычислениях вручную.

Развитие и совершенствование артиллерийского вооружения и боеприпасов идет по пути увеличения их эффективности. Все эти задачи связаны с управлением протекания внутренних процессов при выстреле. Пути повышения дульной скорости снарядов, базирующиеся на неклассических схемах, основаны как на вводе энергии в заснарядное пространство, так и на перераспределении энергии порохового заряда на ускорение снаряда. Экспериментальная отработка схем требует больших временных и материальных ресурсов. Математическое моделирование этих процессов помогает вскрывать основные закономерности функционирования новых схем ограничивать область рассматриваемых решений.

Вопрос повышения скоростей метания снарядов для увеличения бронепробиваемости и дальности стрельбы, для проведения экспериментальных

исследований по аэробаллистике и высокоскоростному взаимодействию тел с преградами является актуальным. Этот вопрос решается как путём совершенствования классического выстрела, так и в направлении создания принципиально новых схем, наибольшее распространение среди которых получили двухступенчатые пушки, электродинамические системы и взрывные ускорители.

Одной из схем, удачно сочетающей классическое орудие и новый принцип дополнительного подгона, является эстафетная схема выстрела (ВЭС).

Эстафетная схема выстрела (ВЭС) может быть реализована на обычных типах порохов и обеспечить прирост дульной скорости для установок среднего калибра при одинаковом максимальном давлении на дно канала ствола и массе заряда. Прирост дульной скорости здесь, помимо условий заряжания и величин  $\omega/q$  и  $Cq$ , зависит от величины задержки воспламенения дополнительного заряда.

Такие оценки и прогнозирование могут быть проведены на основе математических моделей, адекватно описывающих рассматриваемые процессы, а также при экспериментальных исследованиях систем использующих перспективную схему.

**Актуальность исследования** обусловлена проблемой повышения начальных скоростей метания снарядов при выстреле из артиллерийских орудий и пороховых баллистических установок.

Особую остроту указанная проблема приобрела в настоящее время ввиду совершенствования защиты боевой техники от поражения.

Таким образом, **актуальность магистерской работы** обусловлена необходимостью исследования применения новой схемы выстрела с разделением заряда для повышения скоростей метания.

**Новизна исследования** заключается в разработке математической модели схемы метания, газодинамических методов моделирования функционирования рассматриваемых систем новой схемы выстрела.

**Методы исследования:** физико-математическое моделирование процессов, происходящих в баллистических системах новой схемы. Экспериментальное исследование функционирования систем с использованием новой схемы выстрела.

**Степень разработанности темы исследования.** Впервые классическая ПЗВБ в газодинамической постановке методом характеристик была решена С.А.Бетехтиным (1947) и А.П.Гришиным (1948). В дальнейшем эта тема развивалась в работах В.М.Ушакова (1971). В 80-х годах моделирование ПЗВБ систем с разделением заряда было проведено А.И.Сафроновым.

**Целью** работы является обеспечение повышения скоростей метания элементов по сравнению с достигнутыми в настоящее время значениями.

**Объект** исследования – математические модели пороховых баллистических систем, обеспечивающие метание элементов.

**Предмет** исследования – новая математическая модель схемы метания, обеспечивающая повышение скоростей метания по сравнению с классической схемой.

Исходя из цели исследования и для проверки выдвинутой гипотезы необходимо решить следующие **задачи**:

- изучение возможностей повышения начальных скоростей метания элементов из ствольных систем при использовании схем выстрела ВЭС.
- разработка и реализация математической модели схемы с разделением заряда на существующих пороховых баллистических установках.

Определив цель, объект и предмет исследования перейдем к анализу научных работ, по математическому моделированию внутрикамерного процесса с позиции механики гетерогенных сред.

Для продвижения исследования опубликовались две научные статьи на IV международной научно-практической конференции (школе-семинаре) молодых ученых «Прикладная математика и информатика: современные исследования естественных и технических наук» который проходил в период с 23 по 25 апреля

2018 года и на Всероссийской студенческой научно-практической междисциплинарной конференции «Молодежь. Наука. Общество» которая проходила 5 декабря 2018 года.

Объем и структура диссертации: диссертационное исследование состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографии (40 наименований). Работа изложена на 74 страницах, содержит 19 рисунков и 3 таблицы.

# ГЛАВА 1 Теоретическое рассмотрение внутренней баллистики и различных схем метания

## 1.1 Предмет и задачи внутренней баллистики

Внутренняя баллистика - одна из основных артиллерийских технических наук, которая изучает закономерности явлений и процессов, протекающих при выстреле во время сгорания заряда в канале ствола огнестрельного оружия или в камере пороховой ракеты.

Выстрел из орудия – сложный термодинамический и газодинамический процесс очень быстрого, почти мгновенного, превращения химической энергии пороха сначала в тепловую, а затем в кинетическую энергию пороховых газов, приводящих в движение снаряд, ствол и лафет. Этот процесс очень высокой напряженности: длительность выстрела – тысячные и сотые доли секунды; наибольшее давление газов достигает 3000 – 4000 кг/см<sup>2</sup>, температура газов 2500/3500К в момент их образования и 1500-2000К к моменту вылета снаряда; максимальная скорость снаряда при вылете из канала ствола более 700/1000 м/сек, а наибольшее ускорение его – перегрузка – составляет 15000/20000g.

Движение ракеты возникает под действием силы реакции пороховых газов, образующихся при сгорании заряда твердого топлива в ракетной камере и вытекающих из нее через расширяющееся сопло, причем в ракете боевая часть (головка), приборы управления и двигатель в виде достаточно длинной камеры с соплом составляют одно целое. Процесс горения порохового заряда в камере ракеты гораздо менее напряженный, чем горение заряда в канале ствола орудия. Наибольшее давление обычно не превышает 150 – 200 кг/см<sup>2</sup>; длительность процесса горения – единицы и десятки секунд; ускорение ракеты при старте не превышает 10/20g; максимальную скорость ракета получает к концу горения заряда и истечения газов; на траектории ракеты этот момент соответствует концу активного участка.

К общим задачам внутренней баллистики как науки относятся:



1. Изучение и анализ условий и факторов, от которых зависит процесс выстрела из ствольного и ракетного оружия.
2. Установление общих и частных теоретических и экспериментальных закономерностей, характеризующих и сопровождающих процесс выстрела.
3. Разработка методов решения задач, возникающих в процессе исследования выстрела.
4. Разработка специально аппаратуры для исследования явлений и процессов при выстреле.
5. Изыскание путей совершенствования и дальнейшего развития внутренней баллистики как науки, дающей научно-технические основы для ряда смежных артиллерийских дисциплин, проектирующих артиллерийские системы и боеприпасы к ним (сопротивление стволов, теория лафетов, проектирования снарядов, теория дистанционных трубок и взрывателей, проектирование ракет).

При решении сложных теоретических и практических задач внутренняя баллистика нередко прибегает к схематизации и упрощению изучаемых процессов, вводит определенные допущения, что позволяет решать задачи сначала в первом приближении, а затем уточнять полученные решения, учитывая влияние ещё не достаточно изученных факторов.

Иногда согласования расчетных данных с результатами опытов и стрельб приходится вводить коэффициенты согласования, характеризующие недостаточность наших знаний исследуемых процессов и явлений.

Ввиду ряда отличий в конструкции и условиях горения заряда в ствольной системе и ракетной камере вопрос об особенностях в явлении выстрела из этих систем рассмотрим по отдельности. В явлении выстрела из орудия различают следующие основные процессы:

1. Горение пороха и образование газов, нагретых до очень высокой температуры и обладающих большим запасом внутренней энергии; в этом процессе скорость горения зависит в основном от природы и температуры пороха и от давления газов.

2. Преобразование тепловой энергии пороховых газов в кинетическую энергию движения системы газы заряда – снаряд – ствол – лафет.

3. Движение газов заряда, снаряда и ствола.

Все эти процессы взаимно связаны и протекают одновременно.

Несмотря на высокую интенсивность протекающих при выстреле из орудия процессов, они тем не менее закономерны, в определенных пределах управляемы и при сохранении одних и тех же условий заряжания стабильны от выстрела к выстрелу.

Эти особенности процессов выстрела непосредственно зависят от свойства бездымных порохов гореть закономерно параллельными слоями со сравнительно небольшой скоростью, и это позволяет управлять явлением выстрела, т.е. так регулировать приток газов при горении пороха в канале ствола в зависимости от условий горения, чтобы получить нужный закон развития давления и требуемую скорость снаряда при вылете его из канала ствола.

## **1.2 Описание традиционной схемы выстрела**

Во внутренней баллистике термин «выстрел» имеет два значения: во-первых, это известное физическое явление; во-вторых, полный комплект всех элементов, необходимых для производства однократного процесса метания. В этот комплект входят: снаряд определенного назначения, пороховой метательный заряд, гильза (или картуз), куда помещается заряд, и средство воспламенения заряда. В состав некоторых артиллерийских выстрелов включаются дополнительные элементы, например, пламегасители, размеднители, флегматизаторы и т.д.

Пламегаситель (серно-кислый или хлористый калий) предназначен для устранения дульного пламени после вылета снаряда из ствола. Размеднитель используется для уменьшения омеднения канала ствола при движении по нему ведущих устройств снаряда и представляет собой куски оловянной или свинцовой проволоки. Масса размеднителя может составлять до 1% от массы порохового

заряда. В качестве флегматизаторов используются химические соединения, повышающие живучесть стволов в высокоскоростных и высокотемповых артиллерийских системах.

Первоначальное воспламенение метательного заряда осуществляется капсулем-воспламенителем ударного или электрического типа. Поскольку после его срабатывания образуется небольшой объем продуктов сгорания в артиллерийских установках, как правило, используется дополнительный воспламенитель, масса которого составляет до 2,5% от массы основного заряда. В качестве дополнительного воспламенителя обычно применяется дымный порох, образующий при сгорании большое количество мелких раскаленных конденсированных частиц, ускоряющих воспламенение поверхности основного заряда. Масса дополнительного воспламенителя подбирается таким образом, чтобы после его сгорания в зарядной камере создавалось давление  $10 + 15$  Мпа. Если пороховой заряд имеет большую длину, то дополнительный воспламенитель делится на несколько частей и располагается в разных местах по длине заряда. При использовании удлиненных зерновых зарядов воспламенитель может размещаться на оси гильзы в перфорированной трубке, которая называется стержневым воспламенительным устройством.

В процессе выстрела выделяются следующие периоды.

Предварительный или начальный период – от момента срабатывания капсуля-воспламенителя до начала движения снаряда. В этот период, как правило, сгорает дополнительный воспламенитель, загорается вся поверхность основного заряда и давление в зарядной камере повышается до давления форсирования снаряда. Давлением форсирования снаряда называют давление при котором снаряд начинает движение (форсирует). В действительности форсирование представляет собой достаточно сложный процесс, определяемый особенностями выстрела. Все отмеченные процессы протекают при постоянном объеме.

Первый период – от начала движения снаряда до момента сгорания порохового заряда.

Второй период – от момента сгорания до вылета снаряда из ствола. Следует отметить, что такое деление выстрела на периоды сложилось на рубеже 19-20 веков отчасти под влиянием разработанного для анализа выстрела математического аппарата.

Период последствий – от момента вылета снаряда из ствола до окончания истечения пороховых газов. В этот период скорость снаряда незначительно увеличивается под действием струи истекающих газов, а ствол и связанные с ним части орудия получают дополнительный импульс, повышающий скорость отката.

Прямая задача внутренней баллистики (ПЗВБ) состоит в установлении связи между геометрическими характеристиками канала ствола, условиями заряжания и баллистическими параметрами выстрела. Под баллистическими параметрами, в узком смысле, обычно понимают значения дульной скорости снаряда и максимального давления выстрела. В более широком плане ПЗВБ есть расчет функциональных зависимостей, определяющих процессы, происходящие при выстреле, количество которых задается используемой математической моделью.

Обратная задача внутренней баллистики (ОЗВБ) заключается в определении геометрических характеристик канала ствола и условий заряжания при которых снаряд заданной массы и калибра приобретет на дульном конце заданную скорость. Ясно, что обратной эта задача является по отношению к прямой и в общем случае она имеет не единственное решение. Поиск оптимальных вариантов решения обратной задачи внутренней баллистики составляет суть баллистического проектирования ствольных систем.

### **1.3 Исследование некоторых нетрадиционных схем выстрела**

Повышение начальной скорости снарядов является одной из основных целей совершенствования артиллерийского вооружения. Если рассматривать проблему

метания безотносительно к конкретному устройству, то для скорости метаемого тела можно записать в самом общем случае формулу:

$$u_{pr} = \frac{2}{m_{pr_0}} \int_0^{x_k} F(x) dx ; \quad (1.1)$$

где  $m_{pr}$  – масса тела;  $x_k$  – длина пути разгона;  $F(x)$  – сила, действующая на тело. Отсюда видно, что эффективно влиять на скорость можно лишь длиной  $x_k$  и силой  $F(x)$ . Маневр величиной силы ограничен прочностью метаемой конструкции и метательной установки. Таким образом, остается возможность варьирования длиной пути разгона и заполненностью диаграммы ускоряющей силы. В этом отношении большинство существующих ствольных систем достаточно совершенны и значительный прогресс возможен лишь путем использования нетрадиционных схем выстрела. В данном разделе под нетрадиционной схемой выстрела понимается выстрел, в комплект которого входят нетрадиционные элементы – низкопористые моноблочные топлива конвективного горения. В процессе ускорения давление метаемого газа меняется вследствие двух основных факторов. Приход газов из-за горения элементов метательного заряда способствует возрастанию давления, а увеличение заснарядного объема – его уменьшению. Поддержание давления на достаточно высоком уровне возможно путем применения в составе метательного заряда прогрессивно сгорающих элементов. В этом отношении большие перспективы имеют моноблочные низкопористые заряды конвективного горения, прогрессивный характер горения которых обеспечивается ростом площади горячей поверхности во время выстрела. Аналогичные перспективы имеют и гелеобразные топлива, если с их помощью удастся обеспечить прогрессивный газоприход также вследствие увеличения площади горячей поверхности. Максимальная скорость метания при мгновенном сгорании заряда однозначно определяется скоростью стационарного разлета газа в вакуум, т.е. средней тепловой скоростью

движения молекул газа, зависящей от его начальной температуры и массы молекул. Поэтому в качестве метательных предпочтительнее легкие газы (водород или гелий). Продукты сгорания известных унитарных топлив имеют гораздо более высокий молекулярный вес, а значит, и меньшие метательные способности.

При сгорании подвижного метательного заряда предельная скорость разлета продуктов его сгорания в вакуум, а следовательно, и метательная способность увеличивается на величину скорости поступательного движения заряда. Очевидно что этот эффект будет заметен, когда удельная кинетическая энергия поступательного движения заряда будет сравнима с его химическим потенциалом. Для современных топлив указанная скорость должна составлять около 3 км / с.

Рассматриваемые преимущества реализуются в выстреле с присоединенным зарядом, представляющим моноблок, горящий с достаточно высокой скоростью с торца, удаленного от снаряда. Для оценки скорости, возможной при такой схеме выстрела, можно использовать формулу К.Э. Циолковского:

$$u_{pr} = u_* \ln \left( 1 + \frac{\omega}{m_{pr}} \right) + u_0; \quad (1.2)$$

где  $\omega$  – масса присоединенного заряда;  $u_0$  – скорость снаряда в момент начала горения присоединенного заряда;  $u_*$  – скорость оттока продуктов сгорания от торца. Видно что скорость метания в такой схеме не ограничена, однако ее преимущества существенно проявляются при скоростях метания выше 2 км / с.

Общая схема выстрелов, рассматриваемых в данном разделе показана на Рисунок 1.

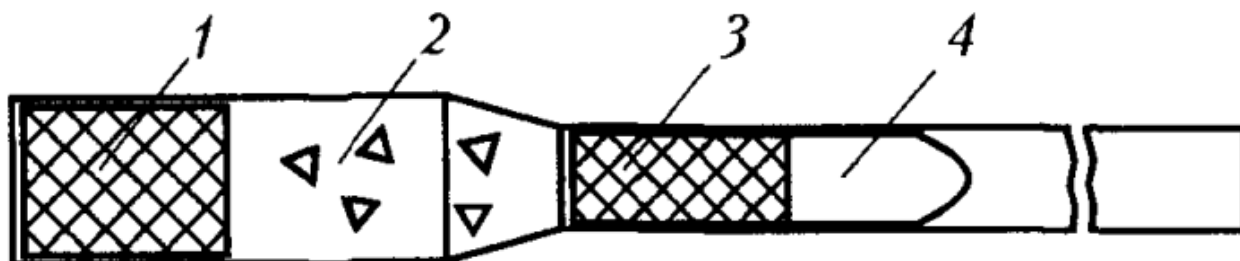


Рисунок 1 – Общая схема выстрела

1 – моноблочный заряд в камере; 2 – традиционный пороховой заряд; 3 – присоединительный заряд; 4 – снаряд.

При теоретическом анализе считается, что моноблочный заряд в камере горит с торца, удаленного от дна камеры с известной линейной скоростью. Это может быть моноблок конвективного горения или любое другое топливо (жидкое или гелеобразное), движением которого во время выстрела можно пренебречь. В любом случае, в результате моделирования устанавливается зависимость газоприхода от времени, обеспечивающая тот или иной положительный эффект. В качестве присоединенного заряда наряду с моноблоками, горящими в конвективном режиме, рассматриваются и гипотетические заряды, что позволяет установить предельные возможности таких выстрелов и сформулировать требования к закону горения.

#### **1.4 Развитие теории движения многофазных гетерогенных сред и моделирование внутрикамерных процессов**

Движение горящих и ещё не воспламенившихся пороховых элементов по каналу ствола в процессе выстрела — классический случай движения гетерогенной системы.

Теории движения многофазных гетерогенных сред рассмотрена в трудах различных авторов. В разные годы этим вопросом занимались: М. А. Гольдштик, С. Соу, А. А. Шрайбер, В. Н. Николаевский, Р. И. Нигматулин, Л. Е. Стернин, А. Н. Крайко, С. Г. Телетов, С. Трусделл, Х. А. Рахматулин, Н. А. Слезкин и др. Наиболее распространенной концепцией, и плодотворной с точки зрения практических приложений, является представление различных фаз гетерогенного потока в виде отдельных взаимопроникающих сплошных сред. Подход, используемый в данном отчёте был сформулирован в 1956 — 1957 гг. Х. А. Рахматулиным и С. Трусделлом и обобщен в работах А. Н. Крайко, Л. Е. Стернина, Р. И. Нигматулина.

Предположения модели:

1. принимается, что параметры течения изменяются, только на расстояниях, которые намного больше чем размер самих частиц или расстояние между ними;
2. всякая фаза является частью объема смеси в то же время, во всяких точках пространства одновременно существуют различные фазы;
3. вычисление движения каждой фазы самостоятельно от смеси можно производить с помощью учета взаимодействия различных фаз;
4. теплопроводность и вязкость существенна только в процессах взаимодействия фаз;
5. столкновениями частиц одинаковых размеров можно пренебречь.

Во многих работах, посвященных теории движения гетерогенных сред, рассматривается движение нереагирующей смеси. Следует отметить работы В. Н. Вилюнова (1964 г.) и Р. И. Нигматулина (1967 г.), где, по-видимому, впервые была получена замкнутая система гидромеханических уравнений двухфазной дисперсной смеси, в которой могут происходить фазовые переходы. В работах Я. А. Каневского, К. П. Станюковича и Дж. Корнера еще в 50-х годах были предприняты первые попытки учета двухфазного характера течения в канале ствола. Дальнейшим развитием этого подхода явились работы В.М.Ушакова, И.Г.Русяка, в которых вопросы численного исследования динамики внутриствольного течения впервые рассмотрены с позиции механики гетерогенных сред. Работы В. В. Жолобова, Ю. М. Циркунова и Г. К. Корниенко также проводились в этом направлении.

Почти одновременно и независимо, такой же подход к решению задач внутренней баллистики был применён в работах зарубежных исследователей. Дело в том, что с самого начала эти работы были направлены на исследование процессов постепенного воспламенения и волн давления в ограниченных пористых зарядах. Отличие состоит в том, что перенос этого подхода на исследование внутренней баллистики орудий был осуществлён лишь с 1976 г. Ниже при выводе системы определяющих уравнений используются идеи,



сформулированные и развитые в работах упомянутых авторов. А именно: пороховые газы и несгоревшие пороховые элементы рассматриваются как гетерогенная смесь, т. е. часть объема смеси  $m$  и  $1-m$  занимает каждая фаза соответственно.

Передвижение этих фаз воспринимается в качестве движения взаимопроникающих сред. При этом геометрия и форма пороховых элементов (включений) отражены в функциях межфазового взаимодействия. На основе полученных уравнений исследуются особенности двухфазного течения в канале ствола.

### **1.5 Анализ возможностей эстафетной схемы**

Рассматриваемую в данной диссертации задачу впервые рассмотрел и поставил В. Н. Вилунов. В 1969 году были опубликованы первые формулировки задачи в соответствующей работе. Из содержания работы следует, что исследователь рассмотрел схему которая позволяет добиться более высокой скорости метания для схемы типа «порох – поршень – порох (ППП)», по сравнению с классической схемой выстрела из ПБУ [23].

Принцип метания заключался в последовательном воздействии пороховых газов на метаемый снаряд и поршень. Пороховые газы получающиеся в результате сгорания отдельной части заряда последовательно ускоряли метаемый элемент. Данная схема метания была названа «эстафетной». Далее по тексту схемы метания данного типа будут называться эстафетным.

Между эстафетной схемой и двухступенчатыми установками есть различия. В ПБУ, при использовании эстафетной схемы выстрела, поршень позволяет сообщать и перераспределять энергию метаемому элементу, стартовавшему одновременно с толкающим поршнем.

Используя возможность перераспределения энергии данную схему можно будет использовать для увеличения скорости метаемого элемента в баллистических системах с ограничением длины канала ствола.

Для повышения начальной скорости метаемого элемента из ПБУ можно разгонять контейнер с этим элементом и после срабатывания основного заряда и определенной задержки в зажигании воспламенять дополнительный заряд. Опишем подробнее данный процесс:

- благодаря капсулю воспламенителю в системе воспламеняется основной заряд, в начальный момент времени;
- далее, после достижения давлением определенной точки форсирования, поршень начинает продвигаться по каналу ствола и дополнительный заряд вместе с ним;
- под воздействием высокой температуры от продуктов горения основного заряда, поджигается дополнительный заряд, по прошествии времени задержки зажигания.

Для стабильного поджигания второго заряда и для повышения КПД будет использоваться определенное воспламенительное устройство. можно использовать диаметр отверстия в поршне, для регулирования времени задержки воспламенения дополнительного заряда или же изменять расположение, диаметр и количество отверстий в перфорированном цилиндре.

От основного заряда будет выделяться энергия пороховых газов, которая будет превращаться в кинетическую энергию толкаемого контейнера, до момента воспламенения дополнительного заряда. В итоге скорость метающего газа второго заряда должна увеличиться. Образованные газы, находящиеся в контейнере между метаемым элементом и поршнем должны привести к сообщению ускорения непосредственно после зажигания дополнительного заряда. В итоге, под суммированным воздействием газов метаемый элемент отделяется от дополнительного контейнера и продолжает движение по каналу

ствола. До тех пор, пока давление с обеих сторон поршня не выровняется, он замедляясь, будет продолжать свое движение.

Благодаря тому, что основным зарядом ускоряется большая масса, его КПД значительно возрастает, при использовании эстафетной схемы. Так же возрастает КПД всей баллистической системы, благодаря тому, что метаемый элемент и контейнер уже будут разогнаны на момент воспламенения дополнительного заряда. Благодаря уже разогнанной массе газов от основного заряда, расширение газов в область толкающего поршня, т.е. его замедление, будет мало, в свою очередь энергия от только что сработавшего дополнительного заряда будет передаваться метаемому элементу.

При использовании данной схемы можно ожидать прирост скорости по сравнению с классической схемой метания, благодаря поэтапному перераспределению энергии. Именно поэтому данная схема является эстафетной.

## ГЛАВА 2 Математическая модель для схемы с разделением заряда

### 2.1 Процесс работы системы с разделением заряда

В этом разделе приводится математическое описание процесса работы эстафетной схемы выстрела. Эстафетный принцип метания заключается в ускорении метаемого элемента (МЭ) за счет последовательного воздействия пороховых газов на диафрагму и МЭ. Пороховые газы, ускоряющие МЭ, образуются от сгорания отдельных частей заряда. Схемы метания, использующие данный принцип, будем называть эстафетными.

С целью повышения начальной скорости МЭ предлагается разгонять камеру подгона или контейнер и воспламенять его пороховой заряд с некоторой задержкой после воспламенения основного заряда. На Рисунок 2 изображен продольный разрез ПБУ выстрела эстафетной схемы. Установка работает следующим образом. В начальный момент времени от капсюля-воспламенителя воспламеняется основной заряд. При достижении давления форсирования диафрагма, дополнительный или контейнерный заряд и МЭ приходят в движение. Дополнительный заряд воспламеняется горячими продуктами горения основного заряда через определенное время задержки зажигания. Для более равномерного и стабильного воспламенения заряда контейнера используется воспламенительное устройство, выполненное в виде перфорированной трубки, жестко прикрепленной к диафрагме и расположенной соответственно с отверстием в диафрагме. Время задержки зажигания заряда контейнера регулируется диаметром отверстия в диафрагме, количеством и диаметрами отверстий в перфорированной трубке.

До момента воспламенения дополнительного заряда энергия порохового газа основного заряда преобразуется главным образом в кинетическую энергию контейнера, что, в конечном счете, увеличивает переносную скорость метающего газа. После воспламенения подвижного заряда и придания МЭ ускорения под действием силы давления порохового газа, большего, чем ускорение диафрагмы, движущейся под действием разности давлений газов основного и дополнительного зарядов, МЭ отделяется от контейнера и начинает

самостоятельное движение по каналу ствола. Диафрагма будет продолжать свое движение по каналу с замедлением, испытывая возрастающее сопротивление движению из-за увеличивающегося давления газов, образующихся при горении заряда контейнера.

Благодаря такой схеме зажигания повышается КПД основного заряда, так как им ускоряется большая масса. Кроме того, заряд контейнера и МЭ разогнаны к моменту зажигания до высокой скорости, и энергия дополнительного заряда после зажигания передается в основном МЭ, так как работа пороховых газов дополнительного заряда, затрачиваемая на перемещение диафрагмы, мала из-за большого сопротивления уже разогнанной массы газов, прилегающих к диафрагме со стороны основного заряда.

Из сравнения с классическим способом разгона можно ожидать повышения скорости МЭ за счет перераспределения энергии пороховых зарядов.

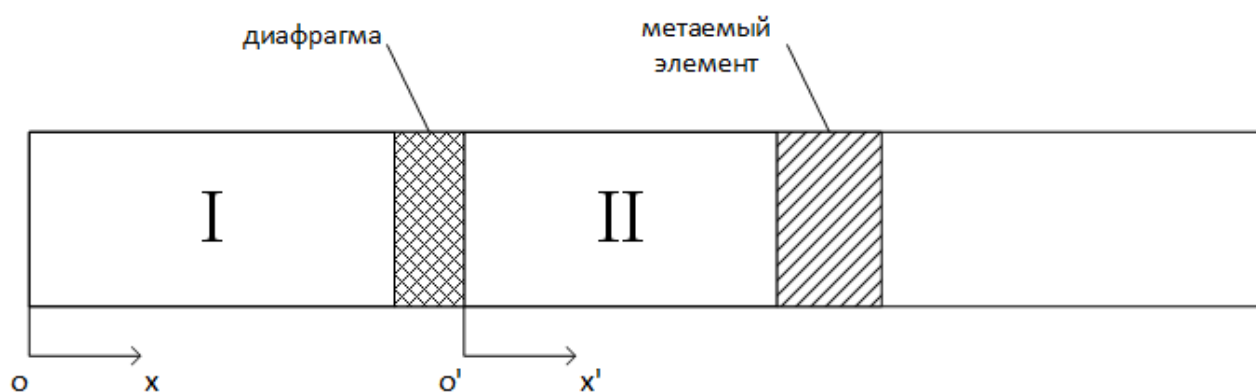


Рисунок 2 – Схема метания с разделением заряда

Вначале будем рассматривать двухфазный поток, состоящий из пороховых газов и совокупности горящих и не горящих частиц зерненого пороха, характерный размер и концентрация которых такова, что выполняется допущение.

Введём дополнительные предположения:

- фазы движутся одинаково;
- можно пренебречь теплоотдачей от зёрен (скорость горения равна скорости тепловой волны в порохе)

- частицы несжимаемы;
- в данном сечении параметры газа внутри и вне пороховых элементов одинаковы.

Приведём вывод одномерных уравнений.

## **2.2 Вывод уравнений равновесия гетерогенной двухфазной реагирующей смеси в канале переменного сечения**

При выводе учитывается взаимодействие со стенками канала.

Постановка задачи включает уравнения, принятые на основе законов сохранения импульса, энергии для газа и массы, и, кроме этого, уравнения количества движения для твердой фазы и массы.

Ранее было показано, что в однородной среде объемная пористость равна поверхностной. На непроницаемых поверхностях, строго говоря, данное утверждение не выполняется (в нашем случае боковая поверхность канала). Однако предположим, что как угодно близко к боковой поверхности канала справедлива гипотеза сплошной среды. В этом случае, несмотря на непроходимость стенок, можно предположить, что пористость среды на стенке равноправна объемной пористости. Чем сильнее неравенство  $l/d_{KH} < 1$ , тем точнее будет выполняться данное предположение, что очевидно, где  $l$  ~ характерный размер включений. Предположение, что на боковой поверхности происходит абсолютно неупругое взаимодействие твердой фазы, вытекает из гипотезы сплошной среды. Значит существует условие скольжения.

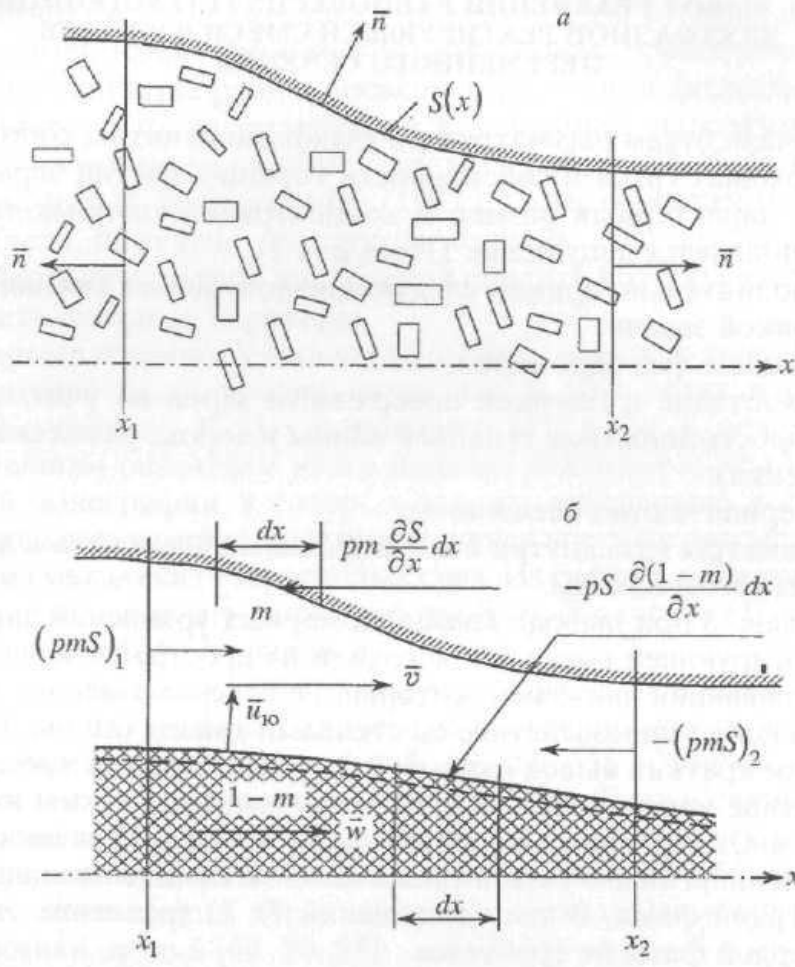


Рисунок 3 – К выводу уравнений равновесия:

а – контрольный объем для вывода уравнений равновесия;

б – схематическое представление двухфазного реагирующего потока.

С учетом вышесказанного для обеих фаз внутри объема  $\Omega$  уравнения сохранения массы имеют вид:

$$\frac{\partial \rho m S}{\partial t} dx = - \int_{\Sigma} \rho m v_n d\sigma + \int_{x_1}^{x_2} G S dx; \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial \delta(1-m)S}{\partial t} dx = - \int_{\Sigma} \delta(1-m) w_n d\sigma + \int_{x_1}^{x_2} G S dx; \quad (2.2)$$

Аналогичным образом можно представить уравнение импульсов любой фазы:

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial \rho m v S}{\partial t} dx = \int_{x_1}^{x_2} \rho m v v_n d\sigma - \int_{x_1}^{x_2} \rho m n d\sigma - \int_{x_1}^{x_2} F_{B3} S dx + \int_{x_1}^{x_2} G w S dx - \int_{x_1}^{x_2} \tau_{1c} \Pi_c dx; \quad (2.3)$$

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial \delta (1-m) w S}{\partial t} dx = - \int_{x_1}^{x_2} \delta (1-m) w v_n d\sigma - \int_{x_1}^{x_2} p (1-m) n d\sigma + \int_{x_1}^{x_2} F_{B3} S dx - \int_{x_1}^{x_2} G w S dx - \int_{x_1}^{x_2} \tau_{2c} \Pi_c dx; \quad (2.4)$$

где  $\tau_{1c}, \tau_{2c}$  — приходящиеся на единицу площади, векторы сил трения газа и пороховых частиц о поверхность ствола.

Необходимо представить силу межфазного взаимодействия, приходящуюся на единичный объем гетерогенной среды, в одномерном случае, так:

$$F_{B3} = \tau_w + p * \frac{\partial (1-m)}{\partial x}; \quad (2.5)$$

где составляющие обусловлена разностью скоростей между фазами, и давлением газа в связи с расширением или сужением трубки тока второй фазы, соответственно (Рисунок 3, б).

За счет притока энергии извне, работы сил давления на ограничивающей поверхности  $\Sigma$ , изменяется полная энергия смеси в объеме  $\Omega$ , за счет горения пороховых зерен изменяется приток химической энергии, за счет трения "частиц газа" о поверхность ствола изменяется расход механической энергии твердой фазы и теплообмен с поверхностью канала. Итак,



$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial t} \int_{x_1}^{x_2} \rho m S \left( \varepsilon + \frac{v^2}{2} + 1 - m S c_k T_H + \frac{w^2}{2} \right) dx \\
& - \int_{\Sigma} \rho m S \left( \varepsilon + \frac{v^2}{2} v_n + \delta 1 - m c_k T_H + \frac{w^2}{2} w_n \right) d\sigma \\
& - \int_{x_2} p m v_n + w_n 1 - m d\sigma + \int_{x_1} G Q - c_k T_H S dx \\
& - \int_{x_1} q_c \Pi_c dx - \int_{x_1} \tau_{2c} w \Pi_c dx;
\end{aligned} \tag{2.6}$$

где  $q_c$  тепловой поток на поверхность канала ствола.

В уравнении (2.6), для математической корректности, записан последний член. Его отсутствие означало бы, что работа сил трения частиц о поверхность ствола способствует повышению энергии газа, при постоянной внутренней энергии твердой фазы, тогда как межфазовое взаимодействие — это единственно возможный механизм передачи энергии между фазами. На самом деле, для нагрева материалов ствола и пороховых частиц при соударении идет тепло, связанное с этим членом. Пренебрежём данными эффектами.

Воспользуемся теоремой о градиенте:

$$\int_{\Sigma} \Phi r n d\sigma = \int_{\Omega} \nabla \Phi r d\omega; \tag{2.7}$$

В одномерном случае, т.к. теорема о градиенте справедлива для непрерывных подынтегральных функций в  $\Omega$  и на  $\Sigma$ , получаем:

$$\int_{\Sigma} p m n d\sigma = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial p m}{\partial x} S dx; \tag{2.8}$$

$$\int_{\Sigma} p(1-m)nd\sigma = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial p(1-m)}{\partial x} i S dx; \quad (2.9)$$

где  $i$  — единичный вектор в направлении оси  $x$ .

Так как подынтегральные функции терпят разрыв при переходе на боковую поверхность ограничивающей поверхности  $Z$ , Теорема Гаусса —Остроградского неприменима, для остальных поверхностных интегралов. Данные интегралы можно представить в виде:

$$\int_{\Sigma} \rho m v_n d\sigma = (\rho m v S)_{x_2} - \rho m v S_{x_1} + \int_{\delta} \rho m v_n d\sigma; \quad (2.10)$$

Так как на стенке  $v_n = 0$ , то интеграл обращается в нуль по боковой поверхности.

Разделив обе части уравнений (2.1) – (2.4), (2.6) на  $(\Delta x = x_2 - x_1)$ , предполагая, что внутри объема  $\Omega$  нет разрывов, переходим к пределу при  $\Delta x \rightarrow 0$  и используя преобразования (2.9) и (2.10) осуществляем переход к дифференциальной форме записи уравнений от интегральной. Учитывая выражение (2.5) имеем:

$$\frac{\partial \rho m S}{\partial t} + \frac{\partial \rho m S v}{\partial x} = S G; \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial \delta(1-m)S}{\partial t} + \frac{\partial \delta(1-m)S w}{\partial x} = -S G; \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial \rho m S v}{\partial t} + \frac{\partial \rho m S v^2}{\partial x} = -m S \frac{\partial p}{\partial x} - S G w + S \tau_w - \Pi_c \tau_{2c}; \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \left[ \rho m S \left( \varepsilon + \frac{v^2}{2} \right) + \delta \left( 1 - m \right) S \left( c_k T_H + \frac{w^2}{2} \right) \right]}{\partial t} + \frac{\partial \left[ \rho m S \left( \varepsilon + \frac{v^2}{2} \right) v \right]}{\partial x} \\ & + \frac{\partial \left[ \delta \left( 1 - m \right) S \left( c_k T_H + \frac{w^2}{2} \right) w \right]}{\partial x} + \frac{\partial [p v m S + p w (1 - m) S]}{\partial x} \\ & = S G Q - c_k T_H - \Pi_c \tau_{2c} w - \Pi_c q_c; \end{aligned} \quad (2.14)$$

Привлекая уравнения неразрывности и количества движения для обеих фаз, уравнение энергии для смеси можно преобразовать в уравнение для внутренней

энергии пороховых газов. Далее, присоединяя к уравнению (2.12) уравнение горения порохового заряда и уравнение состояния продуктов горения в форме Дюпре, окончательно приходим к полной системе одномерных гидромеханических уравнений, описывающих баллистику ствольных систем с позиции механики гетерогенных сред:

$$\frac{\partial \delta(1-m)Sw}{\partial t} + \frac{\partial \delta(1-m)Sw^2}{\partial x} = -1-m S \frac{\partial p}{\partial x} - SGw + S\tau_w - \Pi_c \tau_{2c}; \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho m S}{\partial t} + \frac{\partial \rho m S v}{\partial x} \\ = p \frac{\partial [m S v + 1 - m S w]}{\partial x} + SG Q + \frac{(v-w)^2}{2} + S\tau_w v - w \\ + \Pi_c \tau_c v - \Pi_c q_c; \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + w \frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{S_0}{\Lambda_0} \sigma \psi u_k; \quad (2.17)$$

$$p(1-\alpha p) = k-1 \rho \varepsilon; \quad (2.18)$$

Полученная система уравнений содержит семь неизвестных: параметры газа  $p$ ,  $\rho$ ,  $\varepsilon$ ,  $v$ , скорость твердой фазы  $w$ , пористость смеси  $m$  и относительную долю сгоревшего пороха  $\Psi$ .

В практических расчетах для зерновых порохов удобно заменить уравнение неразрывности твердой фазы уравнением для счетной концентрации пороховых элементов Рисунок 3 (а):

$$\frac{\partial aS}{\partial t} + \frac{\partial aSw}{\partial x} = 0; \quad (2.19)$$

тогда пористость смеси определится из выражения:

$$m = 1 - a\Lambda_0(1-\psi); \quad (2.20)$$

В том случае, когда заряд состоит из длинных пороховых трубок (таких элементов, на длине которых параметры газа меняются существенно), уравнение движения твердой фазы, полученное как уравнение движения сплошной среды, неприменимо, поскольку трубки нельзя рассматривать как сжимаемую среду:  $w = w(t)$ . Если принять, что движение трубчатого заряда в канале ствола происходит

единым пакетом, то скорость его движения можно найти, проинтегрировав уравнение движения твердой фазы по всему объему, занятому пучком трубок. После интегрирования приходим к выражению для скорости центра масс заряда:

$$1 - \psi \omega \frac{\partial w}{\partial t} = 1 - m S_0 p_0 - 1 - m S_L p_L + \int_0^{L_0} p \frac{\partial (1 - m S)}{\partial x} + S \tau_w dx; \quad (2.21)$$

Индекс "0" относится к левому торцу трубок, "L" — к правому торцу.

Средняя относительная доля сгоревшего пороха в заряде равна

$$\bar{\psi} = \frac{1}{L_0} \int_0^{L_0} \psi dx; \quad (2.22)$$

Уравнение же неразрывности твердой фазы или эквивалентное ему уравнение для счетной концентрации вырождается в простое тождество:

$$n = \frac{\omega}{\Lambda_{\text{тр}} L_0 \delta} = \text{const}; \quad (2.23)$$

где

$$\Lambda_{\text{тр}} = \frac{\pi D_0^2 - d_0^2}{4}; \quad (2.24)$$

при этом площадь, свободная для прохода газа, в области движения трубок определяется из выражения:

$$mS = S - n \Lambda_{\text{тр}} (1 - \psi); \quad (2.25)$$

Уравнение сохранения для газовой фазы остаются без изменения, так как их вид не должен зависеть от геометрических характеристик слоя частиц. В таком случае система уравнений для трубчатых порохов описывает двухфазный поток не как движение взаимопроникающих сред, а как течение газа в канале с подвижными стенками.

### 2.3 Конкретизация функций массового и силового взаимодействия гетерогенной системы: пороховые газы – несгоревшие пороховые элементы

При известной линейной скорости горения пороха, газоприток определяется из выражения в единице объема:

$$G = aS_0 \sigma \psi \delta u_k; \quad (2.26)$$

Сила взаимодействия, обусловленная разностью скоростей между фазами, в одномерном потоке состоит из двух составляющих: силы гидравлического сопротивления  $\tau_w^{(1)}$  и так называемого эффекта присоединенных масс — дополнительной нестационарной силы сопротивления  $\tau_w^{(2)}$  обусловленной локальным повышением давления на поверхности частицы за счет ее ускоренного движения относительно несущей фазы:

$$\tau_w^{(1)} = \tau_w^{(1)} + \tau_w^{(2)}; \quad (2.27)$$

$$\tau_w^{(2)} = \beta \rho (1 - m) \left( \frac{d_1 v}{dt} - \frac{d_2 w}{dt} \right); \quad (2.28)$$

где:

$$\frac{d_1}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v \frac{\partial}{\partial x}; \quad (2.29)$$

$$\frac{d_2}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + w \frac{\partial}{\partial x}; \quad (2.30)$$

коэффициент  $\beta$  учитывает форму поверхности частицы; для сферических частиц  $\beta = 1/2$ , для частиц с плоской поверхностью  $\beta = 10$ .

Записанное из представления обтекания совокупности элементов, гидравлическое сопротивление, определяется соотношением:

$$\tau_w^{(1)} = \lambda_w \frac{\rho (v - w) |v - w|}{2} a \frac{\pi d_{\lambda\sigma}^2}{4} f_p; \quad (2.31)$$

В общем случае в выражения (2.28) и (2.31) необходимо внести коррективы, связанные с внутренней пористостью пороховых частиц. Очевидно, такая поправка будет тем меньше, чем меньше отношение внутренней пористости к пористости смеси. Для артиллерийских систем в течение всего времени выстрела — это отношение равно:

$$\frac{m_{\text{вн}}}{m} = 0.03 - 0.10; \quad (2.32)$$

где  $m_{\text{вн}}$  — объем внутренних пустот частиц, содержащихся в единице объема.

## 2.4 Расчет шага

Геометрическая форма канала определяется в табличном виде:

Записываются координаты частей канала, а именно его конические и цилиндрические основания, которые в свою очередь отсчитываются от левой грани канала ( $x = \emptyset$ ), а также записываются соответствующие диаметры основания этих частей.

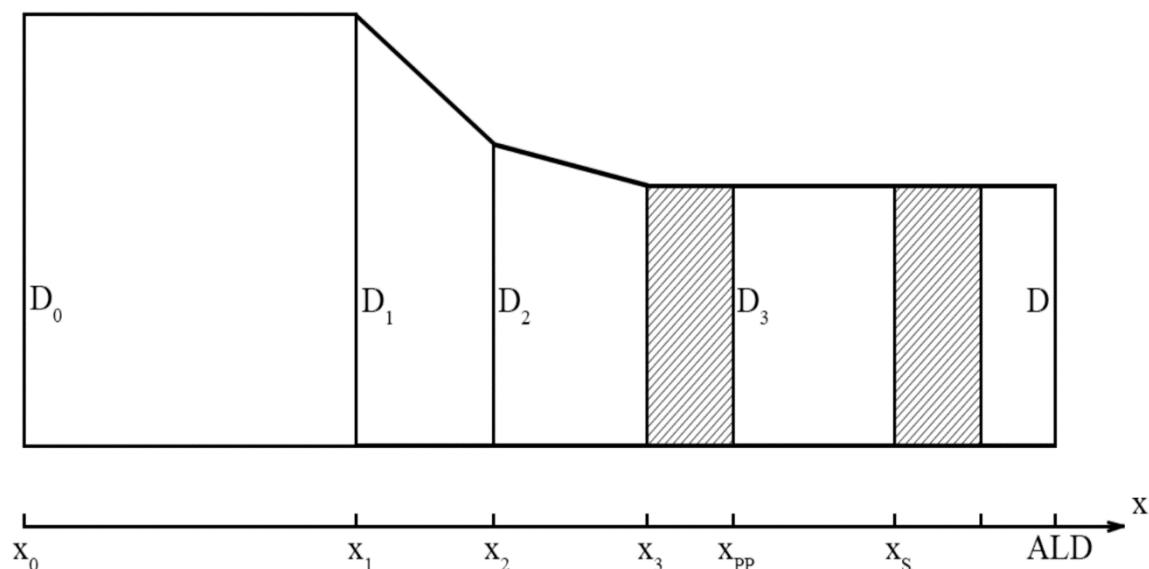


Рисунок 4 – График расчетных областей с координатами

На Рисунок 4 изображены диаметры расчётных областей и их задаваемые координаты. Начальные данные записываются в определенном виде (дециметр-киллограмм-секунда). Для упрощения процесса последующего моделирования и при необходимости корректирования математической модели в программном комплексе имеется распечатка всех исходных данных. Данный вывод включает в

себя пояснительные комментарии и размерность переменных для правильного ввода.

Все уравнения необходимые для расчёта поставленной задачи записаны в безразмерной форме. За масштабы выбраны следующие величины:

- $R_*$  - плотность вещества для области I, масштаб плотности;
- $P_*$  - максимальное зафиксированное давление, масштаб давления после прохождения всей реакции;

- $L_*$  - дистанция между дном диафрагмы и левой границей канала

- масштаб площади  $S_* = \frac{\pi D^2}{4}$ ;

- масштаб скорости  $U_* = \frac{P_*}{R_*}$ .

Отсчет шага задачи по времени получается из описанной ниже последовательности действий:

Величина по времени устанавливается из условий устойчивости;

Во внутренних расчетных ячейках области I совершается вычисление параметров течения среды;

В зависимости от времени  $t$  рассчитывается движение диафрагмы;

Для расчетных ячеек, которые касаются подвижной правой границы в области I выполняется расчет параметров течения среды;

Если входное отверстие вскрывается в регулирующей объем, то выполняется вычисление параметров течения газа в регулирующем объеме;

Выполнится расчет параметров течения газа (учитывающий постепенное инициирование химической реакции) для области II, если произойдет вскрытие выходных отверстий регулирующего объема;

В случае если начнется химическая реакция на верхней грани всех частиц к-фазы, то осуществляются следующие шаги (вместо двух предыдущих);

Во внутренних расчетных ячейках области II совершается вычисление параметров течения среды;

Выполняется расчет движения второй диафрагмы в зависимости от величины времени  $t$ ;

Для расчетных ячеек, которые касаются подвижной границы в области II выполняется расчет параметров течения среды.

После выполнения данных шагов можно получить решение для следующего временного слоя с интервалом времени  $\tau$ . Циклически повторяя счет шага по времени следуя последовательности описанной выше можно получить информацию о нестационарном поведении процесса во времени.



## ГЛАВА 3 Математические модели стрелковых метательных систем для схемы с разделением заряда

### 3.1 Баллистическая система ВПО-208 с разделением заряда

Модель ВПО-208, карабин, который производился изначально для использования в профессиональной охоте, однако, сфера его применения оказалась значительно шире: благодаря сочетанию относительно небольшой массы и компактного размера. Модель ВПО-208 также применяется на соревнованиях по спортивной стрельбе, целевой практике и развлечениям.

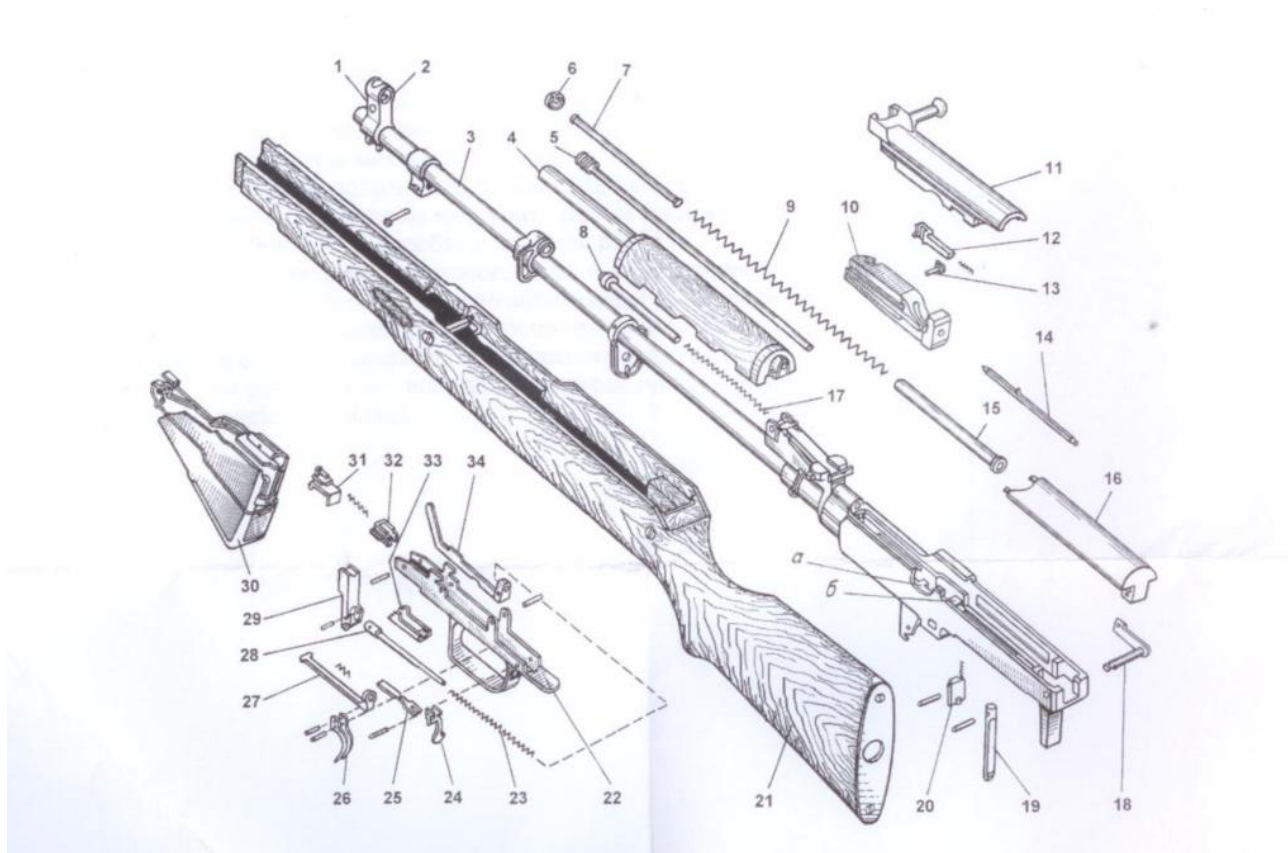


Рисунок 5 – Детальная схема баллистической системы ВПО-208

1 - ползок мушки; 2 - мушка; 3 - ствол с коробкой ствольной; 4 - накладка ствольная; 5 - шток с поршнем; 6 - шайба пружины возвратной; 7 - стержень пружины возвратной; 8 - толкатель; 9 - пружина возвратная; 10 - остов затвора; 11 - стебель затвора; 12 - выбрасыватель; 13 - чека ударника; 14 - ударник; 15 - трубка пружины возвратной; 16 - крышка коробки; 17 - пружина толкателя; 18 - чека крышки коробки; 19 - защелка скобы; 20 - останов затвора; 21 - ложа; 22 -

скоба спусковая; 23 - пружина боевая; 24 - предохранитель; 25 - пружина предохранителя; 26 - крючок спусковой; 27 - рычаг спусковой; 28 - стержень пружины боевой; 29 - курок; 30 - магазин; 31 - защелка крышки магазина; 32 - шептало; 33 - разобщитель; 34 - автоспуск; а – отражатель; б – боевой упор.

В Таблица 1 ниже представлены характеристики баллистической системы ВПО-208.

Таблица 1 – Характеристики ВПО-208

Характеристика	Карабин ВПО-208
Страна производства	Россия, компания «Молот оружие»
Использование	Охота, спортивная стрельба
Тип	Самозарядный гладкоствольный карабин
Емкость магазина	10 с возможностью замены на магазин большего объема
Общая длина	1120 мм
Общая ширина	57 мм
Общая высота	202 мм
Вид боеприпасов	7.62x39
Длина ствола	625 мм
Вес	4.89 кг

Данная модель была изготовлена на основе многих знаменитых неразборных карабинов Симонова с 10-зарядным магазином. Присутствует более усовершенствованный спусковой механизм молоткового типа, который обеспечивает высокую скорострельность.

Повышения скорости метания пули можно добиваться за счёт разделения заряда патрона на несколько частей при увеличении полной массы метательного заряда. При правильно подобранных массах частей метательного заряда и типах порохов процесс выстрела реализуется без превышения максимального допустимого давления пороховых газов в канале ружья. Например, в [1] рассмотрена возможность применения «эстафетной» схемы в охотничьем ружье РМ-153. В случае разделения заряда для этого ружья на три части и при подборе массы и типов частей метательного заряда без превышения допустимого максимального давления пороховых газов была экспериментально и теоретически получена скорость метания пули примерно на 20% более высокая по сравнению с классической схемой метания, то есть без разделения заряда.

Представляет интерес использование «эстафетной» схемы выстрела, например, на карабине ВПО-208 с более высоким допустимым максимальным давлением пороховых газов в канале, чем на РМ-153.

Предлагается разделить заряд патрона на 2 (бинар) части. Реализовать разделение можно с использованием картонной диафрагмы. При этом практически на основную часть метательного заряда может устанавливаться картонная диафрагма с наружным диаметром 9,5 мм, а затем может засыпаться дополнительная часть метательного заряда. В ВПО-208 использовались навески пороха «Сокол».

Работу рассматриваемой системы можно обеспечить за счет реализации зажигания дополнительная часть метательного заряда в строго определённый момент времени после зажигания основной части заряда. Задержку зажигания дополнительного заряда можно реализовать, например, за счет воспламенения дополнительного заряда перетекающими в область присоединённого заряда иницирующими газами основного заряда через малое центральное отверстие в картонной диафрагме.

Рассмотрим использование «эстафетной» схемы в системе ВПО-208 представленной на Рисунок 6.

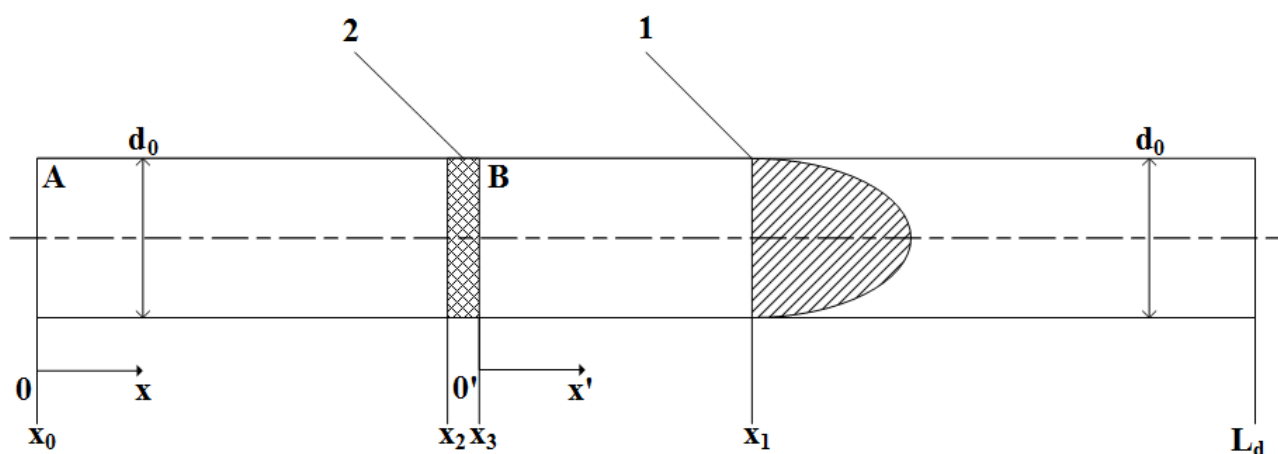


Рисунок 6 – Расчётная схема «эстафетного» выстрела с зарядом, разделённым на две части (бинар): А, В – области, где располагаются части разделённого заряда; 1 – диафрагма; 2 – метаемый элемент;  $d_0$  – диаметр цилиндрического канала системы;  $L_d$  – длина ствола с учётом длины патронника.

Для удобства проведения расчётов используется комбинированная система координат, связанная с дном патрона и с диафрагмой Рисунок 6. Решение проводится на основе модели гетерогенных сред [1,2,3,4].

Задача решается численно на основе метода С. К. Годунова [5].

### 3.2 Двухскоростная среда

При решении прямой задачи внутренней баллистики для системы с разделением заряда (схема на Рисунок 6) вводятся следующие допущения:

- в состав заряда входят зёрна пороха малого размера;
- зерна пороха имеют скорость, равную скорости окружающих пороховых газов;
- начальный слой каждого заряда пороха зажигается посредством мгновенного охвата пламенем в момент времени, соответствующий времени зажигания;
- следует пренебречь теплоотдачей и трением газа, появляющееся на стенках ствола и камеры;

- при достижении определённого уровня давления (давления форсирования) начинается движение сборки;
- процесс горения зёрен пороха происходит в соответствии с геометрическим законом горения;
- объём перетёкших газов в сборку не учитывается.

### 3.3 Баллистическая система МР – 153 с разделением заряда

Гладкоствольное полуавтоматическое ружье МР-153 является одним из наиболее широко производимых видов охотничьего оружия. Имеет возможность регулировки газового поршня.

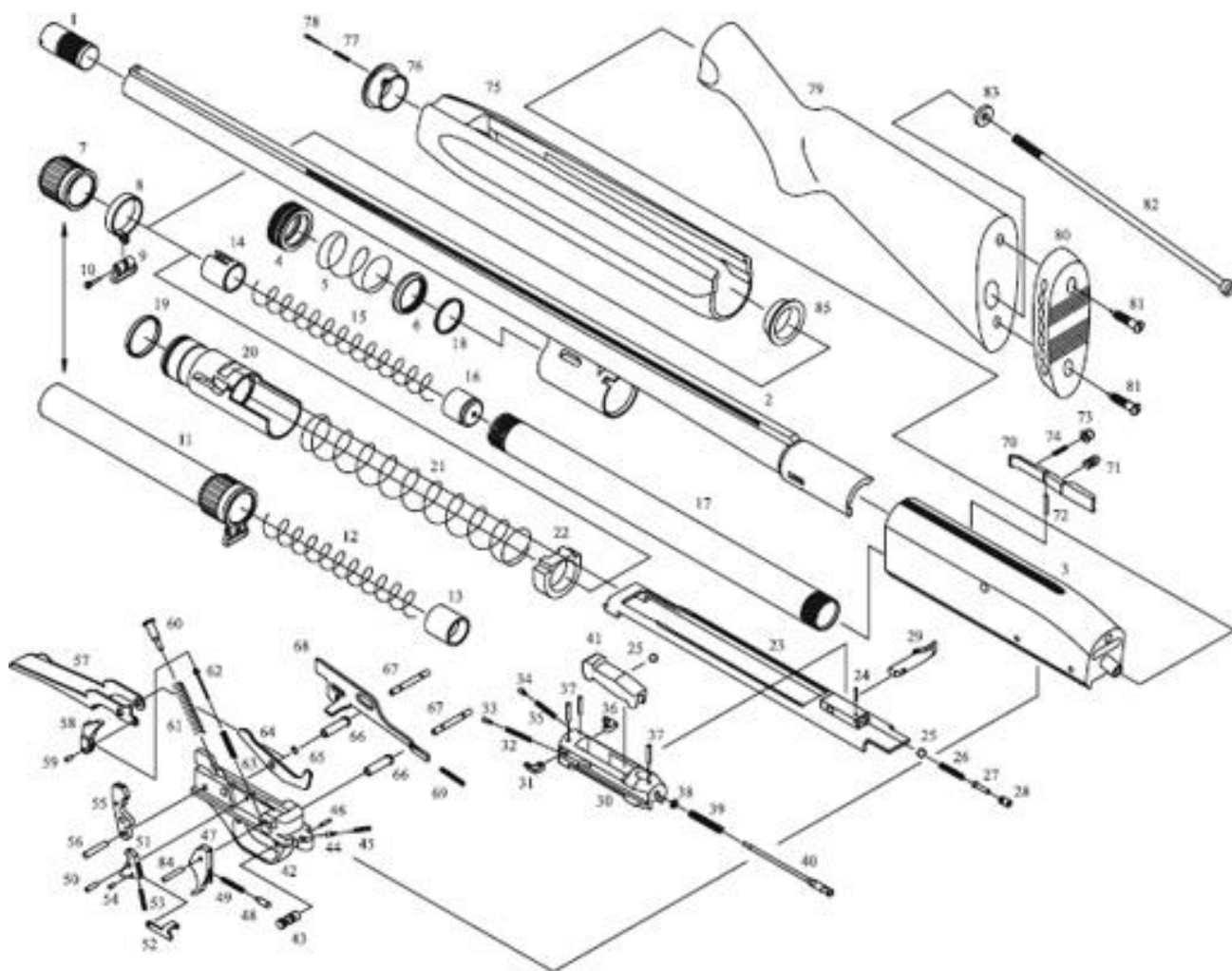


Рисунок 7 – Детальная схема баллистической системы МР-153.

1 - сменный насадок; 2 - ствол; 3 - коробка; 4 - гайка камеры; 5 - пружина канала; 6 - клапан; 7 - гайка; 8 - хомут антабки; 9 - кольцо антабки; 10 - винт; 11 - гайка-удлинитель; 12 - пружина удлинителя; 13 - переходник удлинителя; 14 - стакан; 15 - пружина магазина; 16 - стакан; 17 - трубка магазина; 18 - кольцо поршневое внутреннее; 19 - кольцо поршневое наружное; 20 - поршень; 21 - пружина возвратная; 22 - кольцо; 23 - тяга в сборе; 24 - штифт вставки; 25 - шарик; 26 - пружина ползуна; 27 - толкатель; 28 - втулка; 29 - рукоятка; 30 - затвор; 31 - извлекатель; 32 - пружина извлекателя; 33 - гнеток извлекателя; 34 - гнеток выбрасывателя; 35 - пружина выбрасывателя; 36 - выбрасыватель; 37 - ось; 38 - шайба; 39 - пружина ударника; 40 - ударник; 41 - клин; 42 - основание ударно-спускового механизма; 43 - предохранитель; 44 - гнеток предохранителя; 45 - пружина предохранителя; 46 - штифт; 47 - спусковой крючок; 48 - гнеток спуска; 49 - пружина спуска; 50 - ось шептала; 51 - шептало; 52 - толкатель шептала; 53 - пружина шептала; 54 - штифт; 55 - курок; 56 - ось курка; 57 - лоток; 58 - серьга; 59 - ось; 60 - толкатель курка; 61 - боевая пружина; 62 - толкатель серьги; 63 - пружина лотка; 64 - задержка; 65 - втулка задержки; 66 - ось с кольцом; 67 - штифт; 68 - удерживатель; 69 - пружина удерживателя; 70 - перехватыватель; 71 - пружина перехватывателя; 72 - ось перехватывателя; 73 - кнопка перехватывателя; 74 - пружина кнопки перехватывателя; 75 - цевье; 76 - корпус фиксатора; 77 - пружина фиксатора; 78 - фиксатор; 79 - приклад; 80 - затыльник-амортизатор; 81 - шуруп; 82 - винт; 83 - шайба; 84 - ось спускового крючка.

В Таблица 2 – Характеристики МР-153 ниже представлены характеристики баллистической системы МР-153.

Таблица 2 – Характеристики МР-153

Характеристика	МР-153
Страна производства	Россия, Ижевский механический завод

Использование	Охота, спортивная стрельба
Тип	Полуавтоматическое ружьё
Емкость магазина	4 с возможностью установки удлинителя до 8 патронов
Общая длинна	1280 мм
Вид боеприпасов	12/70
Длина ствола	750 мм
Вес	3.45 кг

Для повышения скорости полёта пули за счёт увеличения полной массы метательного заряда без превышения максимального давления пороховых газов можно использовать разделение заряда патрона на несколько частей. В частности, заряд патрона можно разделять на 2 (бинары), 3 (тринары) и 4 (кватра) части, соответственно. Патрон тринар, например, снаряжался следующим образом: в пластмассовую капсюлированную гильзу калибра 12/70 фирмы Шеддит, Италия, с капсюлем-воспламенителем СХ-2000, засыпался основной метательный заряд из пороха «Сокол» (масса 1,1 г). Сверху на основной метательный заряд устанавливалась картонная диафрагма с наружным диаметром 19 мм. Затем засыпалась дополнительная часть метательного заряда из пороха VectanAS (масса 1,0 г). Сверху устанавливалась аналогичная картонная диафрагма. Затем засыпалась вторая дополнительная часть метательного заряда из пороха VectanAS (масса 0.9 г).

После этого метаемый элемент и пыж-обтюратор помещались в гильзу. Специальным методом под названием «завальцовка» заделывалась гильза патрона. Снаряженный патрон составляет высотой 64мм. Можно заметить, что пули патрона «МОНО» обладают аналогичной конструкцией.

Для разработки конструкции нового патрона, проводился анализ данных приведенные в работах [1-7] по высокоскоростным патронам. Впервые задача

метания, соответствующая решаемой с учётом задержки зажигания частей заряда, была поставлена В.Н. Вилуновым в 1969 г. Была показана эффективность «Эстафетной» схемы с одним присоединённым к метаемому элементу зарядом.

На Рисунок 8 представлена схема для высокоскоростного метания в баллистических системах с присоединёнными зарядами (СПЗ), рассмотренная в [8].

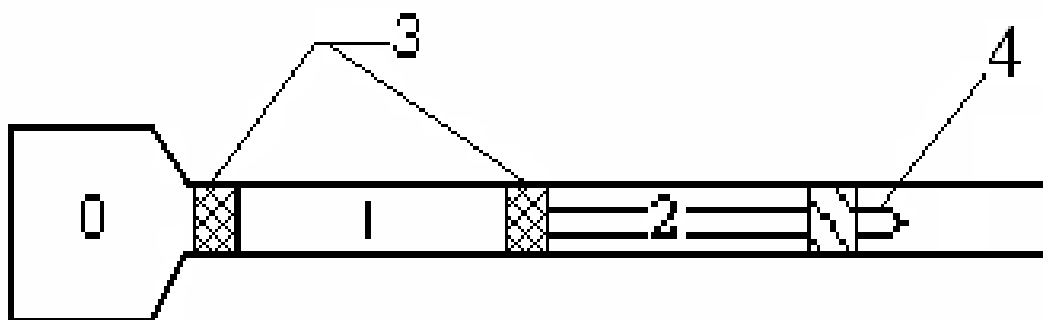


Рисунок 8 – Схема метания СПЗ: 0 – камера основного заряда; 1 – область первого присоединённого заряда; 2 – область второго присоединённого заряда; 3 – поршни; 4 – метаемый элемент

Теоретический анализ патрона с разделением заряда, можно проводить при подобном подходе, для ружья МР – 153 (патронник 89 мм). В частности, заряд можно делить на три части (тринар).

Вводится специальная, комбинированная система координат, которая связана с дном патрона и перегородками Рисунок 9, она позволяет упростить расчёты. Основная смесь, на которой будет приводиться решение, является газопороховой [8].

При использовании модели гетерогенных сред была решена задача подгона элемента метания на баллистической системе с одним присоединённым зарядом. Решение задачи приведено в [9].



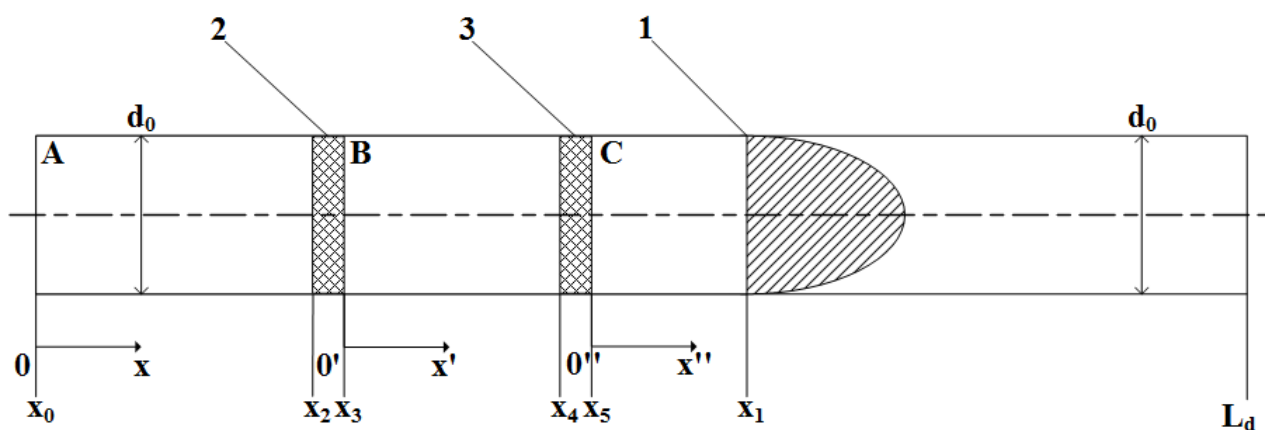


Рисунок 9 – Расчётная схема с зарядом, разделённым на три части (тринар): А, В, С – области, где располагаются части разделённого заряда; 2 – первая перегородка; 3 – вторая перегородка; 1 – метаемый элемент;  $d_0$  – диаметр цилиндрического канала ружья;  $L_d$  – длина ствола с учётом длины патронника.

Заряд в области А воспламеняется первым, метаемый элемент и оставшиеся части заряда включая сборку перегородки начинают движение как единое целое. Заряд в области В воспламеняется спустя обусловленное время задержки зажигания. Так же происходит и с зарядом в области С.

Таким образом понижается максимальное давление пороховых газов в патроннике, при штатной массе патрона. Это достигается за счет использования последовательной схемы срабатывания частей заряда. Отсюда следует что суммарный заряд можно увеличить, не превышая максимальное давления ружья. В патроннике ружья МР – 153 максимальное давление составляет 1050 бар, импульсы частей заряда подбирались соответственно.

Выше была рассмотрена баллистика выстрелов с разделением порохового заряда на три части (тринар).

### 3.4 Использование Метода Годунова для математического моделирования производительности баллистических систем

В данном пункте описывается квазиодномерный метод Годунова для моделирования двухступенчатых газовых пушек. Метод имеет третий порядок точности по пространству и второй порядок точности по времени. Для подсчётов

используется численный метод Римана. Построены модели трения и передачи тепла от газов и плотных сред к стенкам трубки с использованием простой неравновесной модели турбулентности для потоков газа. Метод также использовался для моделирования горения пороха в патроннике на первой стадии. Правдоподобные уравнения состояния (УС) использовались для всех сред.

Метод был проверен относительно точного решения Римана для проблемы ударно-волновой трубки, плотные среды воздействуют на скоростях до 20 км/сек, поток протекает через сужающееся сопло на сверхзвуковой скорости и сжигает порох в манометрической бомбе. Затем метод использовался для прогнозирования производительности двух газовых пушек (1.5 дюйма и 0.28 дюйма) находящихся в исследовательском центре Эймса. Прогнозы метода были сравнены с измеренными давлением в пороховой камере и в поршневом стволе, и с измеренными скоростями поршня и снаряда. Получено очень хорошее согласование между предсказаниями и измерениями расчетной гидродинамики.

Установлено, что фактические скорости горения пороха в пушке значительно выше (60-90%), чем прогнозируется изготовителем и поведение поршня, при выходе, сильно отличается от того, которое предполагалось после испытаний с низкой скоростью деформации.

В 1993 году, после пребывания закрытым в течение нескольких лет, был вновь запущен радиационной баллистический полигон в исследовательском центре Эймса, НАСА. Тесты проводились в 1993-94 годах с использованием Эймсовских 0.28 и 1.5 дюймовых двухступенчатых газовых пушек. Такие тесты проводились, в основном, для симуляции повреждений сегментов стен космической станции и космических челночных плит от космического мусора. Эймс уже долгое время служил в качестве источника знаний агентства в области исследований, разработки и испытаний пусковых установок для газовых пушек[37].

Для испытаний на удар по космическому мусору было желательно увеличить скорость пушки, чтобы обеспечить более полное моделирование

возможного диапазона скоростей воздействия космического мусора. Такое увеличение скорости должно выполняться с большой осторожностью, чтобы избежать чрезмерной эрозии пушки и механического перенапряжения пушки или пусковой установки. Также желательно уменьшить максимальное давление пушки и снаряда и эрозию пушки при сохранении начальной скорости.

Экспериментальная разработка оружия является очень дорогостоящей и долгой по времени (восемь или более рабочих параметров орудия могут быть изменены) и так же имеется риск нанести значительный ущерб для самого объекта. Необходим хорошо зарекомендовавший себя, удобный для пользователя код для расчета рабочей жидкости, способный направлять выбор рабочих параметров пушки для безопасного и экономичного достижения увеличения начальной скорости и/или уменьшения максимального давления пушки и её эрозии. Метод, описанный в данной статье, был использован, для увеличения начальной скорости пушки Эймса 1.5 дюйма (для довольно тяжелого снаряда) с 6.6 до 7.1 км сек, в то же время уменьшая эрозию орудия на 50 процентов.

На Рисунок 10 показан эскиз (не в масштабе) двухступенчатой газовой пушки. Слева направо мы видим пороховую камеру, начальное положение пластикового поршня в поршневом стволе, очень длинный поршневой ствол, изначально заполненный водородом или гелием, суживающуюся часть, диафрагму сразу за снарядом, снаряд в его начальном положении и ствол пушки (или пусковая трубка). При воспламенении порохового заряда поршень ускоряется до скорости порядка 800 м/с. Поршень перемещается вниз по поршневому стволу, сильно сжимая и нагревая рабочий газ. Рабочий газ может быть объемно сжат в 1000 раз, достигая давления примерно 10 000 бар и (теоретические) температуры до 3000 К. В определенный момент процесса сжатия диафрагма разрывается, и снаряд начинает ускоряться вниз по стволу пушки.

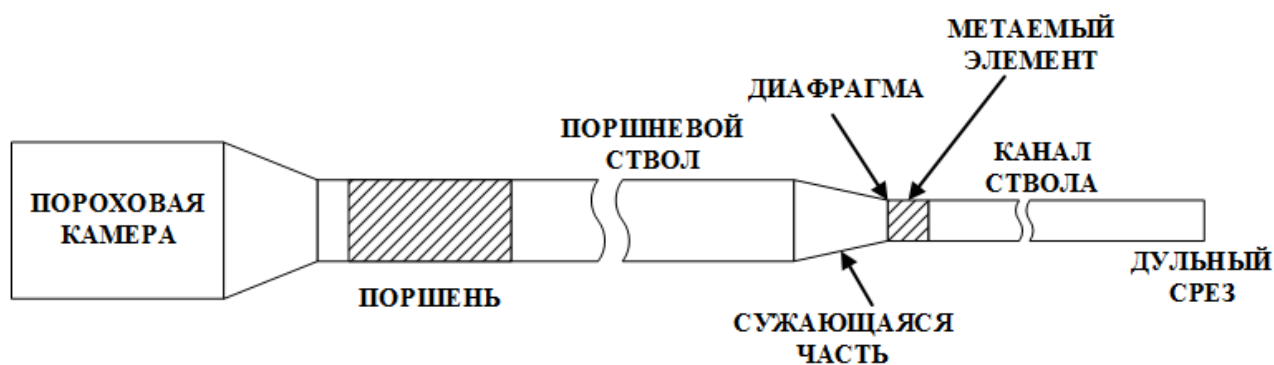


Рисунок 10 – Представление двухступенчатой газовой пушки

Большим преимуществом двухступенчатой пушки над одноступенчатой пороховой или газовой пушкой является следующее. Для одноступенчатой пушки трудно достичь скорость звука движущегося газа, которая намного превышает 1-1.4 км/сек. Обычно это ограничивает начальную скорость такой пушки до максимума в 2,5-3 км/сек. При использовании технологии двухступенчатой пушки энергия порохового газа переносится с достаточно высокой эффективностью на гораздо меньшую массу низкомолекулярного рабочего газа. Скорость звука рабочего газа при максимальном сжатии может достигать 4-4,5 км/сек. Это позволяет двухступенчатой пушке достигать нормальных скоростей 7-8 км/сек с довольно высокой частотой. С очень легкими снарядами и большим ударом пушки можно получить скорости, достигающие 10-11 км/сек.

Все среды, находящиеся в пушке (порох/пороховой газ, поршень, рабочий газ и снаряд) подвергаются очень высоким давлениям и температурам и поэтому должны быть смоделированы с помощью уравнений состояния (УС), которые являются точными в этих условиях. В качестве примера УС для идеального газа обычно очень неточно при установке двухступенчатых пушек. Поршень и снаряд могут демонстрировать высокую скорость деформации, которая сильно отличается от той, которая ожидалась бы на основе имеющихся данных о низкой скорости деформации. Очень важно тщательно смоделировать трение и теплопередачу газов и твердых тел на стенке трубы, что может привести к сокращению (см. 2 и 3) начальной скорости на 10-20 процентов. Желательно

оценить, в какой степени неравновесная турбулентность в потоках газа может влиять на поверхностное трение и теплообмен на стенки трубки.

Двухступенчатая газовая пушка не была единственной проблемой квазиодномерного потока, которую необходимо было смоделировать в Эймсе в этот момент времени. Был также интерес к взрывоопасным взрывным устройствам, высокоактивным ускорителям.

Эти явления требуют точного моделирования при давлениях от 300 КБар до 10 МБар и более высоких давлений, что значительно превышает типичные максимальные давления в легких газовых пушках (10-15 КБар). Желательно получить метод, который мог бы справиться с проблемой высокого давления, а также подходил для моделирования легких газовых пушек.

Был рассмотрен ряд методов вычислительной гидродинамики [34, 35] для одно- и двухступенчатых пушек. Известно [34, 36], что эффекты переноса трения и излучения могут привести к уменьшению скорости на 10-20 процентов. Метод ALE [35] не вычисляет весь цикл пушки, а скорее начинается с заданной скорости поршня и его точечной массы. Пороховая и поршневая деформация не обрабатываются. Модель газового трения не включает число. Для УС водорода используется 28-коэффициент, подходящий для табличных данных. Метод MOOREA [30, 31] использует объемные УС Ван-дер-Ваальса для газового и порохообразных газов поршневого ствола и сегментированные термические УС для газового поршневого ствола. Модель трения для поршня и снаряда либо использует постоянную силу в основании поршня или снаряда, либо увеличивает массу поршня или снаряда на несколько процентов. Модель LLG3 [32] использует объемные и термически совершенные УС для газового поршневого ствола. Модель газового трения не включает эффект стеновой температуры, и нагрев стенки от поршневого и пускового трения, по-видимому, не включается. Модель HVML89 [33], разработанная из более ранней модели, использует УС Ван-дер-Ваальса для поршневого ствола и пороховых газов и изотермические УС для поршневых материалов.

Ни один из этих методов не включал эффекты неравновесной газовой турбулентности и ограничения УС не позволяли им получать точные результаты при давлении в мегабар. Кроме того, все рассмотренные методы не справились с включением одно или нескольких дополнительных явлений, которые желательно моделировать. Авторы подчеркивают, что нет ничего плохого в методах, обсуждавшихся выше, в случае, когда они используются для целей, для которых они были написаны и на самом деле они дали большое количество очень полезных результатов. Скорее, они нелегко поддаются моделированию всех явлений, которые мы хотели бы изучить в двухступенчатых пусковых газовых пушках, а также изучать мегабарные давления (по крайней мере, без существенных изменений). Значительные изменения в рамках программы другого исследователя могут быть чрезвычайно длительным и, порой, экономически неэффективным процессом (хотя можно довольно легко научиться запускать хорошо задокументированный код, написанный другим исследователем).

Вкратце, методика Годунова решает задачу Римана на каждой границе ячейки в каждый момент времени, чтобы вычислить поток между двумя клетками, о которых идет речь, в поставленной задаче. На Рисунок 11 показана  $x$ - $t$ -волновая диаграмма задачи Римана. Абсцисса - это расстояние (перпендикулярное границе ячейки) от одной ячейки к другой, а по оси ординат - время, начинающееся с начала временной отметки. Начальными условиями на обеих сторонах границы ячейки в начале временной отметки являются условия 1 и 4. Динамика задачи Римана порождает волну давления, распространяющуюся в среду левой ячейки, поверхность раздела между двумя средами и волна давления, распространяющаяся в среду правой ячейки. Эти волны и интерфейс показаны на Рисунок 11.

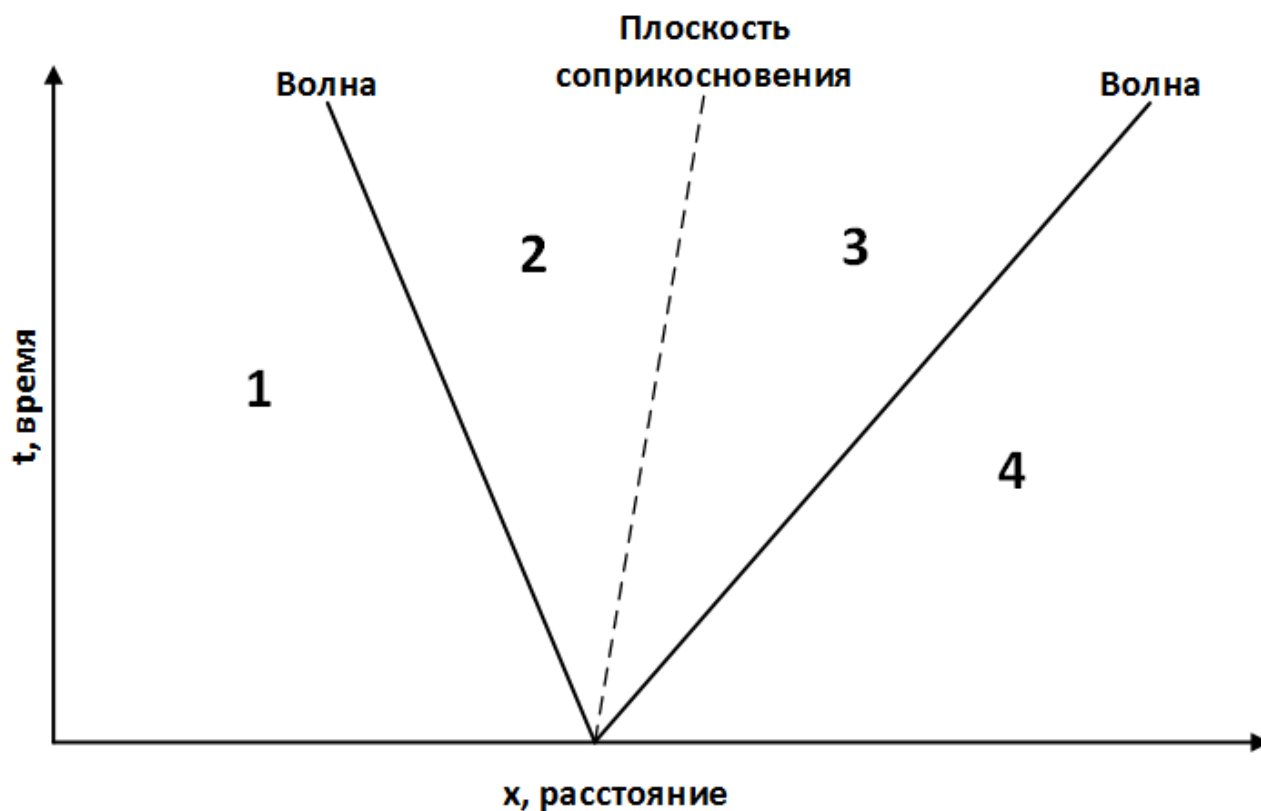


Рисунок 11 –  $x$ - $t$  волновая диаграмма Римана для проблемы между двумя клетками.

Условия в двух новых зонах 2 и 3 могут быть рассчитаны на много разных степеней точности, если это необходимо. Затем поток вычисляется в соответствии с зоной, в которой граница ячейки находится во время указанного времени. Для случая, показанного на Рисунок 11, если граница ячейки была неподвижной, ее путь на диаграмме  $x$ - $t$  был бы вертикальным и находился бы в зоне 2. Затем потоки будут оцениваться просто и непосредственно из условий среды зоны 2. Этот метод является чрезвычайно гибким. Не требуется никаких предположений об уравнениях сред. Нет необходимости явно вставлять любую искусственной вязкости. Экстраполяции (или интерполяции) к рассматриваемой границе ячейки могут быть первой, второй, третьей или даже более высокой точностью порядка. Метод Римана так же может быть первой, второй или более высоким порядком точности, и он может быть легко изменен в соответствии с рассматриваемой проблемой.

Особенности нового метода Годунова более высокого порядка, представленные здесь, включают следующее:

1. Метод моделирует полный двухступенчатый цикл пушки, начиная с горения пороха и заканчивая снарядом, выходящим из дульного среза.

2. Метод использует технику Годунова, описанную выше, которая была показана [38], очень надежной для плотных сред и чрезвычайно высоких скоростей. Метод имеет третий порядок точности в пространстве и второй порядок, точности по времени. Метод Римана имеет очень высокую точность, являясь точным для ударов и использует очень точный степенной закон интегральной схемы для волн расширения.

3. Метод использует реалистичные УС для всех сред. УС для твердых тел включает в себя влияние как плотности, так и энергии на давление и будет оставаться в силе для мегабарных давлений. В моделирование поршня и снаряда можно ввести простые модели для эффекта высокой деформации.

4. Включены трение и теплопередача из газов и плотных сред на стенку трубы. Модель газофазного трения и теплопередачи включает сжимаемость и эффекты температуры стенки. Включен простой режим неравновесной газовой турбулентности.

5. Основные алгоритмы способны производить точные результаты при давлениях в мегабарный диапазон. Таким образом, код может быть использован для моделирования взрывоопасных детонаций или эффектов воздействия гипервизии. Во время проверки кода с использованием точных аналитических решений были получены точные решения задачи вычислительной гидродинамики при давлениях до 8 мегабар. Более ранняя версия кода [38] позволила получить точные решения при давлениях до 10 000 мегабар.



## **ГЛАВА 4 Компьютерное моделирование схемы с разделением заряда**

### **4.1 Анализ программных средств для реализации**

С развитием вычислительной техники многие операции, ранее выполняемые человеком, стали осуществляться много быстрее. В частности, применение автоматических и автоматизированных средств актуально в областях, где использование человеческого труда связано с определенными рисками в отношении здоровья оператора. Одними из таких областей, несомненно, являются военные технологии, к которым, наверное, в первую очередь, и относятся задачи внутренней баллистики, т.е. перевод объекта (снаряда) из некоторого заданного начального положения в желаемое конечное или некоторую окрестность этого положения. Анализ литературы показал, что отдельные математические аспекты внутренней баллистики описаны в достаточно большом количестве учебников, в том числе отечественных. В основном это учебники по внутренней баллистике. Однако, тем не менее, несмотря на встречающиеся описания теоретических аспектов рассматриваемых задач, их практические аспекты в виде задачи автоматического управления системой прицеливания либо не решаются, либо, что вероятнее, решаются, но в открытом доступе найти их сложно из-за определенной степени секретности.

Для повышения эффективности баллистических систем необходимо использовать современные подходы, основывающиеся на баллистических компьютерных моделях. Данные разработки также необходимы для создания новых артиллерийских систем, снарядов и зарядов. Для этого необходимо проводить фундаментальные исследования в области теории баллистики с использованием математических и кибернетических методов решения задач баллистики, и разработки программного обеспечения.

Компьютерные модели внутренней баллистики широко используются не только для военных целей, но и для гражданских. Например, в [24] модель

внутренней баллистики была использована для расчета безопасности демпфера в автомобиле.

В отличие от аналитических методов решения основных проблем внутренней баллистики [2], компьютерная реализация является более выгодной, потому что позволяет устанавливать параметры модели не только в виде постоянных, но и в форме функциональных отношений с учетом увеличивающегося количество факторов, влияющих на процесс выстрела.

Прогресс в области языков программирования (ЯП) и средств разработки позволил значительно упростить процесс разработки и придать программному обеспечению новые свойства. В настоящее время более современный объектно-ориентированный подход пришел на смену технологии структурного программирования реализованному в ЯП, таких как Algol, Fortran, Pascal. Новый подход облегчает программирование, отладку и тестирование, поддержку и дальнейшую модификацию. Наиболее удобным для реализации программных систем, разработанных в рамках этого подхода, является язык программирования, поддерживающий стиль объектно-ориентированного программирования. Среди них наиболее распространенным является C++, который имеет ряд преимуществ перед другими объектно-ориентированными языками. Во-первых, это компилируемый язык программирования, который сочетает в себе функции языка программирования высокого уровня с возможностью выполнять операции с данными низкого уровня, что позволяет создавать высокоскоростные программы. Во-вторых, компиляторы с поддержкой C++ существуют практически на всех вычислительных платформах.

Сущность объектно-ориентированного подхода в разработке программных систем для моделирования понятий и явлений окружающего мира состоит в построении их абстрактных моделей на основе выбора свойств, необходимых для целей разработки. Если моделируемое явление является сложным, то строятся модели его компонентов, а разработанная программная система рассматривается как совокупность абстрактных моделей ее компонентов. В C ++ представление

абстрактной модели представляет собой класс, фактически это тип данных, определенный программистом-разработчиком для моделирования концепции или явления. Класс содержит компоненты данных и методы (функции) для работы с данными. Экземпляр (объект в терминах C++) класса может быть создан в основной памяти компьютера. Классы могут находиться между собой в отношении обобщения или наследования, позволяя выявлять аналогии между ними и строить многоуровневую классификацию в отношении «общего - частного» (иерархия классов). Класс, который находится ближе к вершине иерархии (базовый класс), является носителем более общих свойств по отношению к классам, расположенным дальше от вершины иерархии (производный класс). Это выражается в том, что объект производного типа всегда содержит подобъект базового типа в своем составе, тогда как одинаковые свойства (компоненты данных) для объектов базового и производного типов имеют одинаковые смещения относительно исходного адрес объекта. Это позволяет просматривать объекты производного типа с общих позиций (как объекты базового типа), а использование технологии виртуальных функций при работе с объектами позволяет не терять индивидуальность, присущую объектам производного типа. Можно связать типы, принадлежащие к различным иерархиям для совместной работы, используя указатели (то есть адреса) на эти или основные типы. Построенный таким образом набор иерархий классов, характеризующих различные аспекты моделируемой области, определяет функциональный контент программного пакета. Очевидно, что использование этой технологии разработки позволяет легко изменять состав программного обеспечения путем добавления или исключения классов из иерархии. Очень важна способность динамически создавать и уничтожать объекты абстрактного типа во время работы программного комплекса, что позволяет создавать набор объектов для решения конкретной задачи, руководствуясь спецификацией набора входных данных.

Что касается математического моделирования процессов в газодинамических системах, то первый уровень абстракции определяется

выбором физико-математических моделей, описывающих явление и численные методы их решения. Описанная технология разработки программных систем применяется на этапе внедрения программного обеспечения для компьютерного моделирования рассматриваемой предметной области. Для этого необходимо определить, следующую иерархию понятий с учетом многовариантных типов, задействованных в иерархии:

- область расчета вместе с системой вычисляемых уравнений и методом расчета (сокращенно обозначаемым как «область расчета»);
- граничное условие (сокращенно «граница»);
- геометрия установки;
- закон сопротивления;
- ламинарная скорость горения;
- относительная площадь частиц;
- частица;
- множество частиц;
- вычислительная задача;
- вывод результатов.

Для реализации программного обеспечения была выбрана библиотека Qt [26], которая позволяет создавать мобильное программное обеспечение для различных операционных систем на основе единого кода, написанного на ЯП C++.

#### **4.2 Разработка компьютерной модели схемы с разделением заряда**

При моделировании процессов внутренней баллистики расчеты выполняются по разработанной математической модели, выполненной в области, ограниченной левым краем зарядной камеры поперечного сечения, а справа - поперечное сечение левого конца снаряда для классической схемы заряжения или фронт сгорания для схемы с движущимся зарядом. Считается, что в секции дна загрузочной камеры поток отсутствует.

При определении граничных условий для классической схемы заряжания, наличие снаряда также указывает на условие отсутствия потока. Для схемы заряжания с движущимся зарядом используются условия, приведенные в [25].

Вышеприведенная математическая формулировка решается численно путем модификации метода Годунова, позволяющая увеличить порядок аппроксимации по пространственной координате до второго порядка [27] и время второго порядка [29] и реализовано в виде программного пакета. При создании которого использовались современные технологии разработки программного обеспечения (ПО). Разница между разработанной математической моделью и приведенной в [27, 28] состоит в том, что описание внутренних баллистических процессов основано на единой системе уравнений, написанной для произвольного числа частиц. Расчет периода воспламенения проводился на основе математической модели, приведенной в [28].

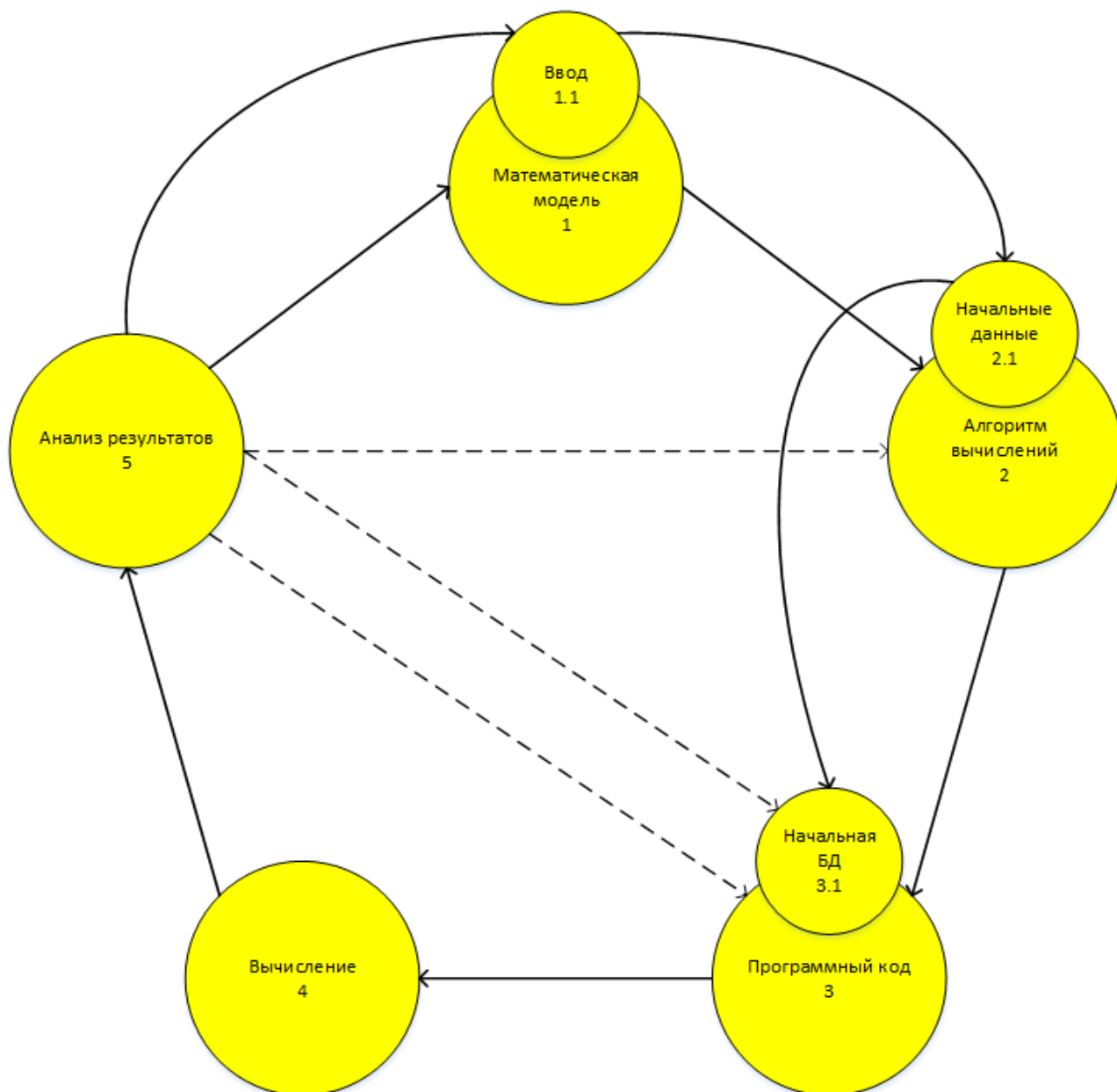


Рисунок 12 – Обобщенное представление процесса компьютерного моделирования

Таблица 3 – Характеристика этапов компьютерного моделирования

№	Наименование этапа	Описание
1	Разработка математической модели баллистической системы	Построение математической модели как формальное, математическое, описание физического явления или объекта.
2	Описание алгоритма вычислений	Выбор численных методов для расчета и разработка вычислительного алгоритма.

3	Выбор программного обеспечения и написание программного кода	Имплементация разработанного алгоритма в выбранное программное обеспечение для инженерных расчетов. Важным элементом в разработке программного кода является определение области существования для начальной базы данных (БД) и развитие инструментов управления.
4	Вычислительный эксперимент	Проведение расчетов и постобработка результирующих вычислительных данных.
5	Анализ полученных результатов	Анализ результатов расчета, сравнение (если возможно) с данными физических экспериментов или с выводами других вычислительных моделей.

На пятом этапе исследователь может вернуться к предыдущим этапам и внести необходимые изменения (например, изменить программный код или уточнить исходные данные). Способы обратной связи показаны пунктирной линией на Рисунок 12.

Перед запуском программы необходимо подготовить список параметров, которые нужны для построения и расчета модели. Данные параметры необходимо записать в файл и сохранить. Файл должен располагаться непосредственно в корне программы, т.к. во время исполнения программного кода должно произойти обращение к этому файлу, откроется поток ввода вывода при помощи функции `fopen_s` содержащейся в заголовочном файле `stdio.h` стандартной библиотеки языка C++ и параметры из файла запишутся в память программы, после чего с ними можно проводить математические операции.

По заданным параметрам программа определяет граничные и начальные условия для определенных переменных в соответствии с поставленными в задаче условиями. Для получения необходимой точности вычислений все переменные

имеют тип данных `double` (двойная точность). Целочисленный тип данных `int` используется для присвоений порядковых номеров элементам, в циклах `for` и т.п.

Далее при запуске программного комплекса происходит вывод начальных значений параметров на экран — это необходимо для проверки корректности введенных данных в задаче. Для удобства проверки каждый параметр выводится в паре с соответствующим обозначением (переменной).

По истечению определенного интервала времени на экран выводится информация о поведении баллистической системы на данный момент (момент времени  $t$ ). Данный список содержит следующие значения:

- скорость метаемого элемента;
- скорость диафрагмы;
- скорость газа;
- скорость сборки;
- давление в областях;
- пористость частицы пороха (1, если конденсированная фаза завершилась и весь порох был сожжён).

Процессы, возникающие в областях I и II, поочередно разбираются программой, т.к. на обе из расчетных областей накладывается разностная сетка со специальными шагами для каждой области. Попутно они разбиваются на ячейки определённой величины и рассчитываются значения на их границах.

Позднее к передаваемой на экран информации добавится вывод параметров из области II — это произойдет вслед за вскрытием входного отверстия в регулирующий объём. Вывод выполняется до момента возбуждения реакции для всех частиц, в последствии печать параметров завершается.

Вычислительная мощность любой ЭВМ, пусть даже 20 летней давности, многократно превосходит способности человека и т.к. вывод на экран параметров, для каждого момента времени, для человеческого восприятия происходит очень быстро, то для анализа полученных результатов необходимо дождаться её завершения. После окончания работы программы на экране останется активная



командная строка с полученными результатами, но из-за специфики хранения данных (в частности размера буфера) часть данных терялась, что не допустимо в нашей работе. Поэтому все результаты параллельно с выводом в консоль записывались в текстовый файл по аналогии с начальными параметрами.

В итоге после окончания работы программного комплекса у нас есть значения для необходимого набора параметров в определенные моменты времени с их помощью можно провести анализ работоспособности системы, построить графики и сделать соответствующие выводы.

### **4.3 Результаты работы компьютерной модели**

Разработанная и описанная компьютерная модель из предыдущего пункта была реализована при помощи современных программных средств и выполнялась на процессоре компании AMD – Ryzen 7 1700 на рабочей частоте 3.5 ГГц. Процессор имел доступ к высокопроизводительной оперативной памяти DDR4 с частотой 3000 МГц.

Начальные параметры включают в себя количество ячеек, которые делят каждую из наших областей; путем уменьшения размера ячеек и соответственном увеличении их количества можно регулировать точность получаемых вычислений.

Достижение более высокой точности посредством увеличения начального набора ячеек соответственно влечет за собой рост времени выполнения программы, поскольку с увеличением количества ячеек увеличивается количество необходимых операций (вычислений), выполняемых на каждом слое. После покрытия областей тестируемой системы разностными сетками, для каждой из них удалось подобрать наиболее подходящее количество ячеек, которое предоставляет нам необходимую точность вычислений и не занимает продолжительное время выполнения программы.

После того, как метаемый элемент преодолеет расстояние, равное длине канала работа программы завершится, оставив на экране последние параметры

указывающие на состояния системы. Как уже описывалось выше в корне программы будет содержаться файл со всеми параметрами системы для каждого момента времени (устойчивость решения проверялась по критерию Куранта – Фридрихса – Леви). Так же в файл добавляется вывод максимальных зафиксированных давлений, для интересующих нас областей.

Данный файл имеет расширение txt и все содержащиеся в нем данные определенным образом отформатированы.

t	U	Us	x1	x2	P1
0.000001	5.0525608698690060e-03	5.0525608698690060e-03	1.7000001812016108e-01	3.4000001812016112e-01	1.6241171579377442e+0
0.000001	1.0181254274767897e-02	1.0181254274767897e-02	1.7000002725368081e-01	3.4000002725368083e-01	1.6485982221423297e+0
0.000002	1.5387226870234036e-02	1.5387226870234036e-02	1.7000016445074465e-01	3.4000016445074466e-01	1.6734486952676006e+0
0.000003	2.0671617841914177e-02	2.0671617841914177e-02	1.7000029376973572e-01	3.4000029376973573e-01	1.6986741635269671e+0
0.000004	2.6035605826866971e-02	2.6035605826866971e-02	1.7000046127734969e-01	3.4000046127734967e-01	1.7242803054857283e+0
0.000004	3.1480388442730878e-02	3.1480388442730878e-02	1.7000066754880427e-01	3.4000066754880426e-01	1.7502728810682135e+0
0.000005	3.7007177975299108e-02	3.7007177975299108e-02	1.7000091316795987e-01	3.4000091316795988e-01	1.7766577612832732e+0
0.000006	4.2617206841051296e-02	4.2617206841051296e-02	1.7000119872744440e-01	3.4000119872744444e-01	1.8034398722366709e+0
0.000006	4.8311727377598757e-02	4.8311727377598757e-02	1.7000152482879696e-01	3.4000152482879703e-01	1.8306270320609390e+0
0.000007	5.4092009620937354e-02	5.4092009620937354e-02	1.7000189208260266e-01	3.4000189208260267e-01	1.8582246671158713e+0
0.000008	5.9959347317504200e-02	5.9959347317504200e-02	1.7000230110864126e-01	3.4000230110864132e-01	1.8862377665695307e+0
0.000009	6.5915042526050988e-02	6.5915042526050988e-02	1.7000275253600189e-01	3.4000275253600187e-01	1.9146731802683634e+0
0.000009	7.1960430494012656e-02	7.1960430494012656e-02	1.7000324700323197e-01	3.4000324700323203e-01	1.9435379303588389e+0
0.000010	7.8096857314002163e-02	7.8096857314002163e-02	1.7000378515849504e-01	3.4000378515849505e-01	1.9728365821857317e+0
0.000011	8.4325693048331277e-02	8.4325693048331277e-02	1.7000436765969570e-01	3.4000436765969572e-01	2.0025750720762003e+0
0.000011	9.0648326635990484e-02	9.0648326635990484e-02	1.7000499517463327e-01	3.4000499517463328e-01	2.0327612256628096e+0
0.000012	9.7066168014765447e-02	9.7066168014765447e-02	1.7000566838114475e-01	3.4000566838114471e-01	2.0634012004085260e+0
0.000013	1.0358064970727410e-01	1.0358064970727410e-01	1.7000638796726120e-01	3.4000638796726118e-01	2.0944999935192441e+0
0.000014	1.1019322803875368e-01	1.1019322803875368e-01	1.7000715463137392e-01	3.4000715463137393e-01	2.1260649454136455e+0
0.000014	1.1690537641354112e-01	1.1690537641354112e-01	1.7000796908238131e-01	3.4000796908238134e-01	2.1581044324551137e+0
0.000015	1.2371858972159426e-01	1.2371858972159426e-01	1.7000883203982700e-01	3.4000883203982701e-01	2.1906240940694710e+0
0.000016	1.3063438884457312e-01	1.3063438884457312e-01	1.7000974423407020e-01	3.4000974423407021e-01	2.2236305560362841e+0
0.000016	1.3765431804989409e-01	1.3765431804989409e-01	1.7001070640646279e-01	3.4001070640646280e-01	2.2571312335667439e+0
0.000017	1.4477993795360664e-01	1.4477993795360664e-01	1.7001171930949177e-01	3.4001171930949181e-01	2.2911341532771425e+0
0.000018	1.5201284342750054e-01	1.5201284342750054e-01	1.7001278370696071e-01	3.4001278370696075e-01	2.3256470565131822e+0
0.000019	1.5935464626581841e-01	1.5935464626581841e-01	1.7001390037417347e-01	3.4001390037417345e-01	2.3606773679697035e+0
0.000019	1.6680697458637753e-01	1.6680697458637753e-01	1.7001507009805317e-01	3.4001507009805315e-01	2.3962322122779689e+0
0.000020	1.7437149813430844e-01	1.7437149813430844e-01	1.7001629367735024e-01	3.4001629367735020e-01	2.4323207027675027e+0
0.000021	1.8204989331251531e-01	1.8204989331251531e-01	1.7001757192281552e-01	3.4001757192281556e-01	2.4689493692037878e+0
0.000022	1.8984387251143559e-01	1.8984387251143559e-01	1.7001890565735323e-01	3.4001890565735327e-01	2.5061276388041800e+0

Рисунок 13 – Отформатированные данные, t – время, U – скорость диафрагмы, Us – скорость снаряда, x1 – координата диафрагмы в канале ствола, x2 – координата снаряда в канале ствола, P1 – давление в первой области

Такое форматирование гораздо упрощает анализ результатов по сравнению с обычным выводом программы, когда параметры складываются в кучу без обозначений.

2.0000544457345433e-03 9.1711693464154389e+05 9.1711693464154366e+05 0.000001 5.0525608698690060e-03 5.0525608698690060e-03  
1.06922e-06 1.6241171579377442e+00 1.6241174429653567e+00 9.8 9.8 9.8 0.429887 0.429887 0.50704 0.50704 0.50704 2.000054;  
0.000001 1.0181254274767897e-02 1.0181254274767897e-02 1.7000007275368081e-01 3.4000007275368083e-01 1.6485982221423297e+00  
2.15454e-06 1.6485982221423297e+00 1.6485988008213506e+00 9.8 9.8 9.8 0.429894 0.429894 0.50704 0.50704 0.50704 2.000054;  
0.000002 1.5387226870234036e-02 1.5387226870234036e-02 1.7000016445074465e-01 3.4000016445074466e-01 1.6734486952676006e+00  
3.25623e-06 1.6734486952676006e+00 1.6734382851167524e+00 9.8 9.8 9.8 0.4299 0.429901 0.50704 0.50704 0.50704 2.00005479;  
0.000003 2.0671617841914177e-02 2.0671617841914177e-02 1.7000029376973572e-01 3.4000029376973573e-01 1.6986741635269671e+00  
4.3745e-06 1.6986741635269671e+00 1.6986488760050829e+00 9.8 9.8 9.8 0.429907 0.42991 0.50704 0.50704 0.50704 2.00005479;  
0.000004 2.6035605826866971e-02 2.6035605826866971e-02 1.7000046127734969e-01 3.4000046127734967e-01 1.7242803054857283e+00  
5.50962e-06 1.7242803054857283e+00 1.7242370011388399e+00 9.8 9.8 9.8 0.429914 0.429919 0.50704 0.50704 0.50704 2.000054;  
0.000004 3.1480388442730878e-02 3.1480388442730878e-02 1.7000066754880427e-01 3.4000066754880426e-01 1.7502728810682135e+00  
6.66184e-06 1.7502728810682135e+00 1.7502083085732150e+00 9.8 9.8 9.8 0.42992 0.429929 0.50704 0.50704 0.50704 2.0000547;  
0.000005 3.7007177975299108e-02 3.7007177975299108e-02 1.7000091316795987e-01 3.4000091316795988e-01 1.7766577612832732e+00  
7.83141e-06 1.7766577612832732e+00 1.7765688903414030e+00 9.8 9.8 9.8 0.429927 0.42994 0.50704 0.50704 0.50704 2.0000547;  
0.000006 4.2617206841051296e-02 4.2617206841051296e-02 1.7000119872744440e-01 3.4000119872744444e-01 1.8034398722366709e+00  
9.0186e-06 1.8034398722366709e+00 1.8033248958495491e+00 9.8 9.8 9.8 0.429934 0.429951 0.50704 0.50704 0.50704 2.0000547;  
0.000006 4.8311727377598757e-02 4.8311727377598757e-02 1.7000152482879696e-01 3.4000152482879703e-01 1.8306270320609390e+00  
1.02237e-05 1.8306270320609390e+00 1.8304819906089167e+00 9.8 9.8 9.8 0.429942 0.429963 0.50704 0.50704 0.50704 2.000054;  
0.000007 5.4092009620937354e-02 5.4092009620937354e-02 1.7000189208260266e-01 3.4000189208260267e-01 1.8582246671158713e+00  
1.14469e-05 1.8582246671158713e+00 1.8580468996027624e+00 9.8 9.8 9.8 0.429949 0.429975 0.50704 0.50704 0.50704 2.000054;  
0.000008 5.9959347317504200e-02 5.9959347317504200e-02 1.7000230110864126e-01 3.4000230110864132e-01 1.8862377665695307e+00  
1.26885e-05 1.8862377665695307e+00 1.8860255561934673e+00 9.8 9.8 9.8 0.429956 0.429989 0.50704 0.50704 0.50704 2.000054;  
0.000009 6.5915042526050988e-02 6.5915042526050988e-02 1.7000275253600189e-01 3.4000275253600187e-01 1.9146731802683634e+00  
1.39489e-05 1.9146731802683634e+00 1.9144247116385664e+00 9.8 9.8 9.8 0.429964 0.430003 0.50704 0.50704 0.50704 2.000054;  
0.000009 7.1960430494012656e-02 7.1960430494012656e-02 1.7000324700323197e-01 3.4000324700323203e-01 1.9435379303588389e+00  
1.52282e-05 1.9435379303588389e+00 1.9432499329621251e+00 9.8 9.8 9.8 0.429971 0.430017 0.50704 0.50704 0.50704 2.000054;  
0.000010 7.8096857314002163e-02 7.8096857314002163e-02 1.7000378515849504e-01 3.4000378515849505e-01 1.9728365821857317e+00  
1.65268e-05 1.9728365821857317e+00 1.9725082324418284e+00 9.8 9.8 9.8 0.429979 0.430033 0.50704 0.50704 0.50704 2.000054;  
0.000011 8.4325693048331277e-02 8.4325693048331277e-02 1.7000436765969570e-01 3.4000436765969572e-01 2.0025750720762003e+00  
1.78449e-05 2.0025750720762003e+00 2.0022062997032957e+00 9.8 9.8 9.8 0.429987 0.430049 0.50704 0.50704 0.50704 2.000054;  
0.000011 9.0648326635990484e-02 9.0648326635990484e-02 1.7000499517463327e-01 3.4000499517463328e-01 2.0327612256628096e+00

## Рисунок 14 – Обычный вывод программы

Форматированные данные можно экспортировать в стороннее программное обеспечение для построения графиков, с их помощью можно легко провести анализ полученных результатов и их демонстрацию. В процессе выполнения данного исследования был использован программный продукт компании OriginLab под названием Origin Pro 2015. Данное ПО имеет интуитивно понятный интерфейс и хорошо справляется с построением графиков по большим объемам данных.

Используемые выходные данные:

1. время, с момента удара по капсулю и воспламенения первого слоя заряда;
2. скорость снаряда;
3. скорость диафрагмы;
4. координаты левых граней диафрагмы и снаряда относительно дна канала ствола;
5. давление, создаваемое пороховыми газами на:
  - 5.1. дно области I;
  - 5.2. дно диафрагмы в области II;

5.3. левую границу диафрагмы (из области I);

5.4. левую границу снаряда (из области II).

В результате, данные полученные при помощи разработанной компьютерной модели были проанализированы. Визуализирована зависимость скорости снаряда и диафрагмы от времени (после разделения), для баллистических систем ВПО-208 и МР-153.

## ГЛАВА 5 Итоговый анализ результатов и способов дальнейшего улучшения системы

### 5.1 Анализ результатов выполненного исследования

Математическая модель эстафетной схемы выстрела с разделением заряда была испытана на нескольких действительно существующих баллистических системах. В основном это были баллистические системы ВПО-208 и МР-153, поскольку прирост скорости снаряда вызывал наибольший интерес именно для таких систем. На соответствующую тему произвелась публикация двух статей с описанием и анализом эстафетной схемы с разделением заряда на соответствующих системах.

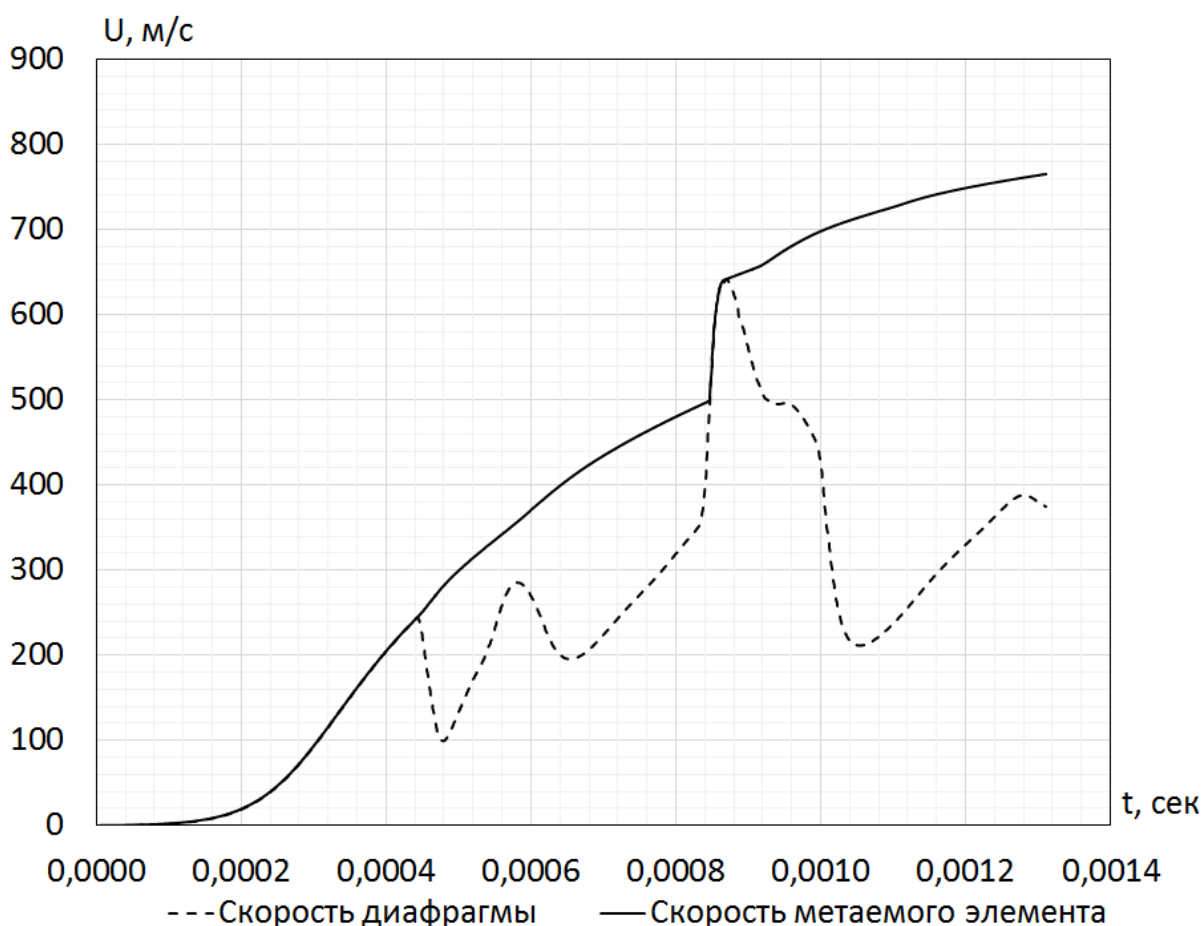


Рисунок 15 – Баллистическая система ВПО-208. Зависимость скорости диафрагмы и метаемого элемента от времени по результатам работы компьютерной модели

Расчёты проводились для варианта, когда масса основного заряда типа «Сокол» составляла 1,1 Г, масса присоединённого заряда типа «Сокол» составляла 0,9 Г, масса метаемого элемента составляла 15 Г. В результате получена расчётная скорость метаемого элемента равная 732 м/с при максимальном давлении 332 МПа в области основного заряда и давлении 238 МПа в области дополнительного заряда. Повышение расчётной начальной скорости метаемого элемента при использовании «эстафетного» выстрела по сравнению со скоростью, реализуемой при классической схеме метания составило примерно 12%.

Компьютерная модель завершает выполнение в момент покидания левой границы снаряда дульного среза. Снаряд преодолевает большую часть расстояния непосредственно после разделения сборки.

В дальнейшем для более наглядного анализа и понимания, когда именно осуществляется разделение сборки, графики будут строиться в зависимости от координаты.



Рисунок 16 – Баллистическая система ВПО-208. Зависимость скорости метаемого элемента от координаты по результатам работы компьютерной модели.

На Рисунок 16 изображена зависимость скорости снаряда от координаты по результатам работы компьютерной модели, для баллистической системы ВПО-208.

На графике заметно, что до отметки в 2,2 дм снаряд ускоряется за счет инициации заряда в области I. Затем, после данной отметки происходит инициация заряда в области II, что на графике отображается резким скачком с 500 м/с вплоть до 620 м/с, данное ускорение снаряд получает преодолев примерно 0,1 дм.



Рисунок 17 – Баллистическая система ВПО-208. Зависимость скорости диафрагмы от координаты по результатам работы компьютерной модели.

На Рисунок 17 изображен график зависимости скорости диафрагмы от координаты по результатам работы компьютерной модели для баллистической системы ВПО-208.

На графике видно, как скорость диафрагмы изменяется на отметке 1,4 дм. В этот момент его левая грань преодолевает данную отметку в канале ствола и происходит инициация заряда 2ой области, после чего снаряд и сама диафрагма получают дополнительное ускорение, хотя ожидалось что скорость диафрагмы будет снижаться.

В дальнейшем, когда снаряд преодолеет определенный путь в канале ствола, расстояние между диафрагмой и стволом расширяется настолько, что давление из области II становится ниже чем в области I что и приводит к



дополнительному ускорению диафрагмы. На графике это отображено в отметке 2.4 дм.

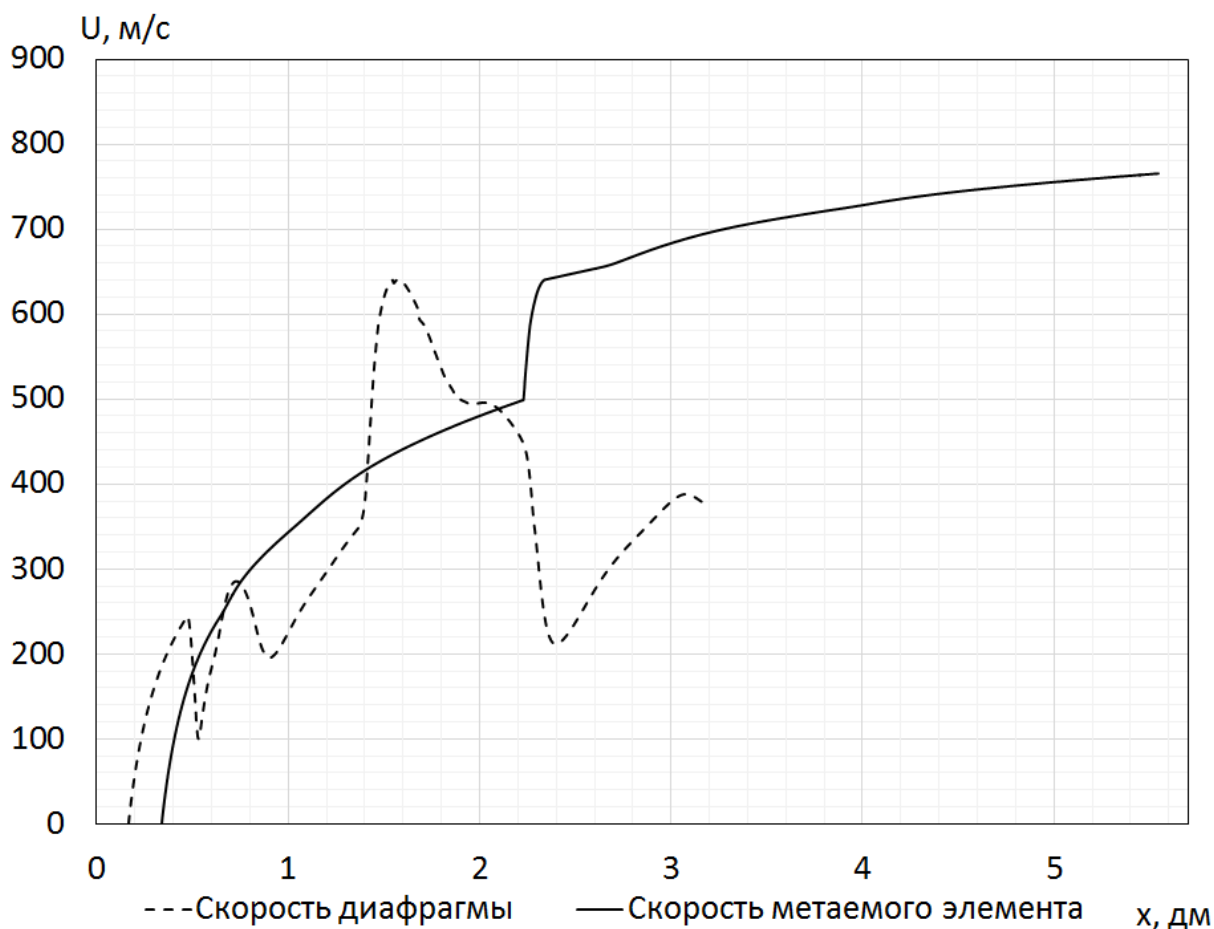


Рисунок 18 – Баллистическая система ВПО-208. Зависимость скоростей метаемого элемента и диафрагмы от координаты по результатам работы компьютерной модели.

По графику на Рисунок 18 заметно, что после воспламенения заряда в области II метаемый элемент и диафрагма значительно ускоряются. В дальнейшем, продвигаясь по каналу ствола, метаемый элемент продолжает ускоряться, а диафрагма замедляется.

Можно заметить, что кривая для диафрагмы заканчивается на отметке в 3.2 дм, это обусловлено работой компьютерной модели, т.к. в этот момент времени снаряд покидает дульный срез, и программа завершает работу.

Таким образом, расчетным путем показано, что при использовании «эстафетной» схемы на системе ВПО - 208 скорости метания могут быть

повышены по сравнению со скоростями метания, реализуемыми при классической схеме выстрела при прочих равных условиях.

Выше был проведен анализ результатов использования схемы с разделением заряда для баллистической системы ВПО – 208. Далее рассмотрим результаты для баллистической системы МР – 153.

Давление пороховых газов, при расчете тринара, не превысило максимальное давление и составило 1044 бар в области 0. Время до воспламенения заряда в области I равно 0.25 мс в области II равно 0.41 мс. Максимальное давление пороховых газов одинаково и составило 1080 бар в I и II области.

Были проведены двадцать тестовых выстрелов, из самозарядного ружья МР-153, с использованием патронов «Тринар». Цифровой электронный хронограф был установлен на расстоянии в два с половиной метра от дульного среза, для измерения скорости полета пули. Средняя скорость пули составила 632 м/с. На расстоянии два с половиной метра кинетическая энергия пули составила 4800 Дж что на 1500 Дж превосходит патрон «МОНО» с его 3300 Дж. Разрешенное давление пороховых газов не превышало предельного значения и зафиксировано на уровне 1000 бар, само ружье МР-153 не получило механических повреждений и исправно функционировало.

Все максимальные давления расчётных областей приходятся на область патронника. Таким образом, реализуется большее наполнение индикаторной диаграммы максимума по сравнению с длительностью максимума давления в варианте «МОНО». На срезе ствола ружья расчетная скорость равна 628 м/с для пули массой 24 г.

Установлено что данная схема позволяет повысить скорость метаемых элементов для баллистической системы МР – 153.

## 5.2 Способы дальнейшего улучшения системы с разделением заряда

Улучшение баллистических систем, а именно схем метания является перспективным направлением. Новые схемы позволяют получать прирост скорости метания не внося кардинальных изменения в само орудие, для использования новых боеприпасов.

В данном исследовании уже упоминалось, что от входных параметров системы, которые указываются при расчёте математической модели, зависит качество и точность получаемых результатов. Можно сделать вывод, что подбор вариантов наиболее подходящих параметров для схемы метания будет способствовать ещё большему приросту к начальной скорости снаряда без критических скачков давления на стенки канала и его дно.

В процессе исследования была разработана новая схема метания, основанная на принципе эстафетной схемы.

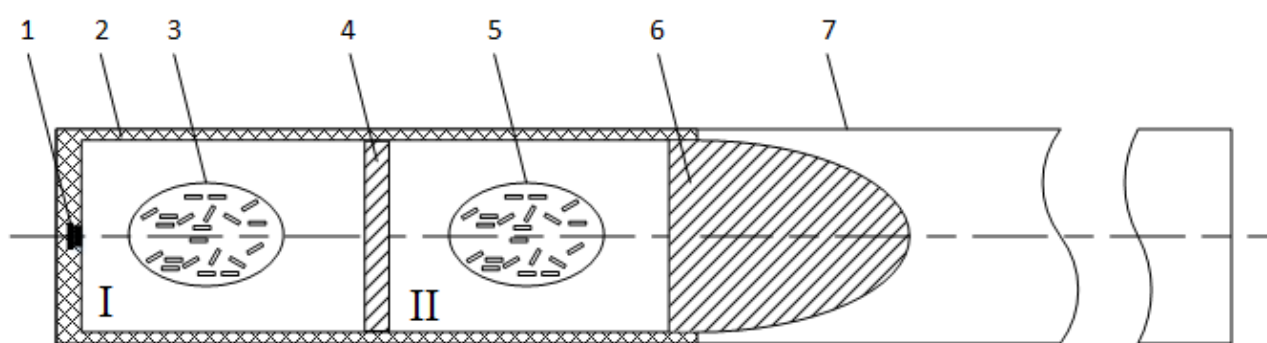


Рисунок 19 – Схема с разделением заряда

I, II – области заряда; 1 – капсюль воспламенитель; 2 – гильза; 3 – пороховой заряд в области I; 4 – диафрагма (перегородка); 5 – пороховой заряд в области II; 6 – метаемый элемент; 7 – канал ствола.

Разработанная схема метания, основанная на эстафетном принципе, была названа схемой с разделением заряда. Весь объем заряда был разделен на две области. При выстреле, в начальный момент времени от капсюля воспламенителя инициируется заряд в области I, а заряд в области II воспламеняется благодаря горячим продуктам горения основного заряда, через определенное время, которое было принято называть временем задержки зажигания. Временем задержки

можно управлять благодаря изменению диаметра отверстия в диафрагме (перегородке) и количеством отверстий.

Можно отметить, что данная сборка не требует увеличения исходной массы пороха и не влечет увеличения массы патрона. Установка перегородки является простой и легко осуществимой в рамках серийного производства и не требует разработки дополнительного станкового оборудования.

Последующие исследования могут учитывать схему с разделением заряда, так как она может иметь большой потенциал, для увеличения начальных скоростей метаемых элементов.

### **5.3 Рекомендации практического характера**

Однако нельзя ограничиваться только теоретическими улучшениями, поскольку одной из задач данного исследования было построение математической модели и её компьютерная реализация. Разработанная в данном исследовании компьютерная модель может использоваться и модифицироваться или быть включена в состав более крупного программного комплекса.

В процессе разработки, отладки и анализа результатов работы компьютерной модели исследователем были предложены несколько рекомендаций касающиеся технической части. По предположению исследователя, данные рекомендации могут помочь модифицировать компьютерную модель сделав её более производительной.

Разработанную компьютерную модель для баллистических систем с разделением заряда можно запустить на суперкомпьютере, после некоторых модификаций. Один из таких суперкомпьютеров, основанный на технологии CUDA расположен в Тольяттинском Государственном университете. Данный суперкомпьютер использует вычислительную мощность большого количества виртуальных ядер и может обеспечить наиболее оптимальную нагрузку на каждое из них. В данном исследовании не рассматривалось распараллеливание компьютерной модели в виду достаточной производительности. Однако, в

дальнейшем может потребоваться повышение точности вычислений или использование других численных алгоритмов, что неизбежно приведет к повышению сложности выполнения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате данного исследования можно сказать что были описаны газодинамические и энергетические процессы внутренней баллистики, а данные сведения были использованы на новой схеме метания – схема с разделением заряда, чей принцип основывается на эстафетной схеме. В ходе выполнения научно-исследовательской работы были сформулированы цели и задачи, определены объект и предмет, выдвинута гипотеза, обозначена актуальность темы исследования.

В математической модели для описания процессов внутренней баллистики было использовано описание газодинамических процессов, так как они являются более точными и полными, чем описание термодинамических процессов во время выстрела.

Были проанализированы существующие на данный момент классические и нетрадиционные схемы метания. Из данного анализа был сделан вывод, что для получения прироста скорости метаемого элемента необходимо вносить модификации в конструкцию снаряда. Исходя из этого вывода для дальнейшего исследования и построения математической модели было решено использовать нетрадиционные схемы метания.

На основании проанализированной литературы по теме диссертации, было описано развитие теории движения многофазных гетерогенных сред. Упомянутые авторы научных работ в разные периоды времени исследовали вопросы представления различных фаз гетерогенного потока в виде отдельных взаимопроникающих сплошных сред.

Основываясь на существующих исследованиях в области внутренней баллистики для достижения цели повышения начальных скоростей метания была выбрана эстафетная схема метания. В процессе описания данной схемы была построена её математическая модель, на основе газодинамических процессов, протекающих во период выстрела, от инициации первого слоя заряда, до покидания метаемым элементом дульного среза. Процессы, протекающие в

дальнейшем не были описаны, так как имеют отношение к внешней баллистики которая не рассматривается в данном исследовании.

Используемая схема метания была переработана в результате чего была разработана принципиально новая схема с разделением заряда. Она сохраняет принцип эстафетной схемы, который требует разделение заряда с обязательной задержкой инициации второго заряда.

В дальнейшем был описан вывод уравнений равновесия гетерогенной двухфазной реагирующей смеси в канале переменного сечения и функций массового и силового взаимодействия гетерогенной системы. В большинстве работ, посвященных теории движения гетерогенных сред, рассматривается движение не реагирующей смеси, а первые попытки учета двухфазного характера течения в канале ствола были предприняты еще в 1950-х годах.

Из разработанной математической модели была реализована её компьютерная модель в виде программы. Для разработки компьютерной модели был выбран язык C++. В дальнейшем компьютерная модель может быть усовершенствована путем добавления в неё графического интерфейса пользователя, что понизит порог входа для использования модели и упростит взаимодействие с ней.

С помощью данной компьютерной модели были проведены вычислительные эксперименты для баллистических систем ВПО-208 и МР-153 с использованием схемы разделения заряда на бинар и тринар соответственно. По полученным результатам было проведено сравнение относительно классической схемы метания. Для баллистической системы ВПО-208 с использованием схемы разделения заряда на бинар прирост начальной скорости метания составил 12% относительно классической схемы метания. Для баллистической системы МР-153 с использованием схемы разделения заряда на тринар прирост начальной скорости метания составил 20% относительно классической схемы метания.

Из данного анализа можно сделать вывод, что использование нетрадиционных схем метания, а именно схемы с разделением заряда, для

баллистических систем ВПО-208 и МР-153 повышает начальную скорость метания. Данная схема метания может быть применена и на других баллистических системах с разделением заряда на 2 (бинар), 3(тринар) и 4(кварта) части. Можно сказать, что компьютерное моделирование газодинамических процессов внутренней баллистики упрощает задачу для исследователя по увеличению начальных скоростей метания и позволяет совершенствовать параметры баллистических систем.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

### *Научная и методическая литература*

1. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. 1. – М.: Наука, 1987 – 464с.
2. Серебряков М.Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. – М.: Оборонгиз, 1962 – 703 с.
3. Корнер Дж. Внутренняя баллистика орудий. Пер. с англ. – М.: Иностранная литература, 1953 – 462 с.
4. Серебряков М.Е. Внутренняя баллистика. – М.: Оборонгиз, 1949. – 670 с.
5. Барышев И.М., Воронин В.Н., Ищенко А.Н., Хоменко Ю.П. Экспериментальное исследование законов сопротивления при течении газа в низкопористой среде в широком диапазоне чисел Рейнольдса // Изв. Вузов Физика. – 1993 - №4. – С.ю 101 – 109.
6. Ищенко А.Н., Хоменко Ю.П. Влияние силового межфазного взаимодействия на характеристики конвективного горения пористых сред// Физика горения и взрыва. – 1997. – Т. 33, № 4. – С. 65 – 77.
7. Душин, С.Е., Красов, А.В., Литвинов, Ю.В. Моделирование систем и комплексов [Текст]: учебное пособие / С.Е. Душин, А.В. Красов, Ю.В.Литвинов. – Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2011. – 178 с. 9.
8. Захаренков, В.Ф. Внутренняя баллистика и автоматизация проектирования артиллерийских орудий [Текст]: учебник / В.Ф. Захаренков. – СПб: Балт. гос. техн. ун-т., 2010. – 276 с
9. 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.
10. 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.

11. Ergun S., Orning A.A. Fluid flow through randomly packed columns and fluidized beds // Ing. And Eng. Chem. – 1949. – N 6. – P. 1179 – 1184

12. Ergun S. Fluid flow through randomly packed columns // Chem. Eng. Progr. – 1952. – V. 48. – P.89 – 94.

13. Нореика Р.М. «Стрелковое тестирование нового серийного высокоскоростного патрона «Искра-М» Новосибирского механического завода». Российский оружейный журнал «Калашников». Оружие, боеприпасы, снаряжение, №10, Санкт- Петербург: ООО «Азимут» 2014, с.54 – 57.

14. Зыков В.А., Кислин М.А., Сысков С.П. «Патрон для гладкоствольных ружей, патент на изобретение RU 2512815, 28.12.2012.

15. Кислин М.А. «Патрон для гладкоствольных ружей, патент на изобретение RU 2512815, 18.10.2005.

16. Кислин М.А. «Патрон для гладкоствольных ружей, патент на полезную модель RU 102103, 04.10.2010.

17. Дягтерев М.Е. «Высокоскоростные пулевые патроны «Искра-М» для гладкого ствола». Российский оружейный журнал «Калашников» Оружие, боеприпасы, снаряжение, №4, Санкт- Петербург: ООО «Азимут» 2014, с.62-67.

18. Дягтерев М.Е. «Высокоскоростной патрон с разделенным пороховым зарядом «Искра-М». Российский оружейный журнал «Калашников» Оружие, боеприпасы, снаряжение, №3, Санкт- Петербург: ООО «Азимут» 2011, с.11

19. Кислин М.А., Маликов А.А. «Патрон для гладкоствольных ружей, патент на полезную модель RU 152680, 10.06.2015.

20. Рахматуллин Х.А. Основы газодинамики взаимопроникающих движений сжимаемых сред [Текст] // ПММ. – 1956. – Т.20. В.1. – С.184-195

21. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред [Текст] // М.: Наука, 1987. – Ч.1. – 464с.

22. Численное решение многомерных задач газовой динамики [Текст] / С.К. Годунов [и др.] // – М.: Наука, 1976. – 400с.
23. Вилюнов В.Н. Теория зажигания конденсированных веществ. Новосибирск: Наука, 1984. 189 с.
24. Kartashova E. D., Muyzemnek A. Yu., Zemskov R. A. Perfection of systems of maintenance of passive safety of cars on the basis of computer modeling of processes of functioning of pyrotechnic elements. News of higher educational institutions. The Volga region. Technical science. 2012. No 3. P. 110–119.
25. Khomenko Yu, Ishchenko A, Kasimov V 1999 Mathematical modeling of internal ballistic processes in barrel systems (Novosibirsk: Publishing house SB RAS) p 256
26. Blanchet J and Summerfield M 2008 Qt 4: Programming the GUI in C ++ (Moscow: KUDITSPRESS) p 736
27. Colgan V 1974 Application of the derivative minimum values principle to the construction of finite difference schemes for calculating discontinuous solutions of gas dynamics Scholarly notes Central Institute of Aerohydrodynamics vol 3 No 6 pp 68-77
28. Rusyak I and Ushakov V 2001 Intracameral heterogeneous processes in barrel systems (Ekaterinburg: URAN) p 259
29. Rusyak I, Lipanov A, Ushakov V 2016 Physical basis and gas dynamics of gunpowder combustion in artillery systems (Moscow Izhevsk: Institute for Computer Research) p 456
30. Bernier, H.; and Gambart, J.: MOOREA, an Internal Ballistic Code for Two Stage Light Gas Gun Study. Presented at the 38th Meeting of the Aeroballistic Range Association, Tokyo, Japan, Oct. 1987.
31. Bernier, H.; and Gambart, J.: Le Code MOOREA: Interpretation du Fonctionnement d'un Canon a Gaz Leger. Presented at the 39th Meeting of the Aeroballistic Range Association, Albuquerque, N. Mex., Oct. 1988.

32. Nappert, L.; Lesage, F.; and Gottlieb, J. J.: Development and Experimental Validation of a Numerical Model for the Prediction of Two-Stage Light-Gas Gun Performance. Presented at the 39th Meeting of the Aeroballistic Range Association, Albuquerque, N. Mex., Oct. 1988

33. Hough, G.; and Liquornik, D.: Interior Ballistics Simulation of the UAH/ARC Light-GAS Guns. Presented at the 43rd Meeting of the Aeroballistic Range Association, Columbus, Ohio, Sept.-Oct. 1992.

34. Charters, A. C.; and Sangster, D. K.: Fortran Computer Program for the Interior Ballistic Analysis of Light Gas Guns. Unpublished manual to CFD code, 1973.

35. Glenn, L. A.: Performance Analysis of the Two-Stage Light Gas Gun. Presented at the APS Fifth Topical Conference on Shock Waves in Condensed Matter, Monterey, Calif., July 1987.

36. Piacesi, R.; Gates, D. F.; and Seigel, A. E.: Computer Analysis of Two-Stage Hypervelocity Model Launchers. Naval Ordnance Laboratory, NOLTR 62-87, Feb. 1963.

37. Canning, T. N.; Seiff, A.; and James, C. S., eds.: Ballistic-Range Technology. AGARDograph 138, Aug. 1970.

38. Bogdanoff, D. W.; and Brackett, D. C.: Godunov Computational Fluid Dynamics Method for Extreme Flow Velocities and Any Equation of State. AIAA J., vol. 27, July 1989, pp. 909-917. 11. Bogdanoff, D. W.; and Miller, R. J.: Improving the Performance of Two-Stage Gas Guns by Adding A Diaphragm in the Pump Tube. Presented at the 1994 Hypervelocity Impact Symposium, Santa Fe/Albuquerque, N. Mex., Oct. 1994.

#### *Электронные ресурсы*

39. Сафронов, А. И., Морозов, А. А., Азовский, В. М. Анализ и баллистическое проектирование системы малого калибра с присоединенным зарядом, 2016 // ИННОВАЦИИ. НАУКА. ОБРАЗОВАНИЕ: электронное научно-

техническое издание. № 4. [Электронный ресурс]: <http://ojs.innovjourn.ru/index.php/innov/article/view/28>

40. Bogdanoff D.W., Miller R.J. New Higher-Order Godunov Code for Modelling Performance of Two-Stage Light Gas Guns. NASA TM – 1995. – 45p. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19960008802.pdf>