

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)

01.03.02 Прикладная математика и информатика
(код и наименование направления подготовки / специальности)

Компьютерные технологии и математическое моделирование
(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему «Моделирование систем эстафетной схемы с использованием метода распада произвольного разрыва»

Обучающийся А.А. Симкин (Инициалы Фамилия) _____ (личная подпись)

Руководитель доктор физ-мат.наук, доцент, А.И. Сафронов
(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Консультант канд.пед.наук, доцент, Т.С. Якушева
(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2022

Аннотация

Темой данной бакалаврской работы является «Моделирование систем эстафетной схемы с использованием метода распада произвольного разрыва».

Актуальность работы заключается в том, что использование «классической» схемы выстрела заметно устарело, с помощью нее уже невозможно значительно повысить скорость снаряда, при этом не создавая опасность для орудия и стрелка. Использование «эстафетной» схемы позволит значительно повысить скорость снаряда.

Объект исследования представляет собой использование метода распада произвольного разрыва, протекающий во время работы «эстафетной» схемы метания.

Предмет исследования – графики и процессы, отражающие процесс «эстафетной» схемы метания.

Цель исследования – создание математической модели схемы метания, позволяющей значительно увеличить скорость элемента за счет использования «эстафетной» схемы, реализовать программу математической модели и на основании ее получить результаты для сравнения с «классической» схемой.

Выпускная квалификационная работа состоит из введения, трех разделов, заключения. Общий объем работы 41 страницы, рисунков 10, использованных источников 29.

ABSTRACT

The topic of this bachelor's thesis is "Modeling relay circuit systems using the method of arbitrary breakup".

The final qualifying work consists of an introduction, three chapters, and a conclusion. The total volume of the work is 41 pages, 10 figures, 29 sources used.

The actual question is that the use of the "classical" firing scheme is noticeably outdated, with the help of it is no longer possible to significantly increase the speed of the projectile, while not creating a danger to the gun and the shooter. The use of a "relay" scheme will significantly increase the speed of the projectile.

The purpose of the study is to create a mathematical model of the throwing scheme, which allows to significantly increase the speed of the element by using a "relay" scheme, to implement a mathematical model program and based on it to obtain results for comparison with the "classical" scheme.

The thesis can be divided into the following logically interrelated parts: analysis of existing throwing schemes; justification of the need to use a "relay" scheme; comparison of the "classical" and "relay" throwing schemes.

Summing up, I would like to emphasize that the classical throwing scheme has exhausted its possibilities in increasing the speeds of the thrown elements. It is especially difficult to achieve an increase in the speeds of the thrown elements on systems where there are strict restrictions on the permissible maximum pressures, both in the chamber of the system and the barrel of the gun. The solution to this problem is possible only when using throwing schemes with the separation of the total charge of the sleeve into parts.

Содержание

Введение.....	5
1. Теоретические основы классической и эстафетной схемы метания.....	7
1.1. Актуальные вопросы систем выстрела.....	7
1.2. Физические основы процесса выстрела.....	7
1.3. Закономерности газообразования и Геометрический закон.....	8
1.4. Уравнение энергии.....	9
1.5. Уравнение движения снаряда	9
1.6. Уравнение состояния пороховых газов	10
1.7. Уравнение Резаля	11
1.8. Основная задача внутренней баллистики.....	11
1.9. Задача о распаде произвольного разрыва.....	14
1.10. Описание классической схемы метания	18
1.11. Предпосылки к эстафетной схеме	20
2. Математическая модель эстафетной схемы	23
2.1. Описание эстафетной схемы.....	23
2.2. Модели газопороховой и двухскоростной сред.....	25
2.3. Математическая модель	29
3. Программная реализация модели	37
3.1 Среда и язык программирования.....	37
3.2 Использование OriginPro 8 для построение графиков	37
3.2 Анализ результатов.....	39
Заключение	42
Список используемой литературы и используемых источников.....	43

Введение

Математическая модель может быть использована для представления самых разных процессов, от самых обыденных до тех, которые связаны с различными космическими или другими трудно объяснимыми явлениями. Например, стрельба из артиллерийских орудий, где происходит множество различных процессов с момента воспламенения пороха до выхода снаряда из орудия.

Главным фактором боевой мощи является не количество артиллерийских установок, а эффективность, с которой она способна поражать противника. Применительно к артиллерийскому орудью учитываются следующие параметры: максимальная дальность поражения, скорострельность орудия, начальная скорость, которой достигает снаряд, масса орудия в боевом положении и др. А для изменения этих параметров, требуется полная переделка конструкция орудия с использованием новейших технологий.

Сама артиллерия впервые была применена для отражения нашествия хана Тохтамыша на Москву в 1382 году. А наука о внутренней баллистике начала складываться после того, как французские ученые ввели уравнение энергии – Резаль, уравнение горения – Сарро, которое замыкало основную систему уравнений классической внутренней баллистики.

Построение математической модели артиллерийских снарядов позволит конструктору более точно рассчитать модель по различным параметрам, таким как длина поверхности, состав и общий объем заряда и т. д., чтобы определить, какая комбинация параметров дает наибольший выигрыш. для частного случая нужного параметра артиллерийского орудия.

Важнейшими чертами классического подхода к основной задаче внутренней баллистики (ОЗВБ) являются абстрагирование конкретных конструкций нагрузки и использование в расчетах средних термодинамических величин по всему пространству снарядов. Эти особенности, с одной стороны, определяют универсальность данного подхода и позволяют рассчитывать

интегральные характеристики широкого класса артиллерийских орудий по относительно простым моделям, с другой стороны, ограничивают их возможности при проектировании скорострельных орудий с большими ω/q и не позволяют его использовать для сравнительного анализа различных схем стрельбы и выбора оптимальной конструкции заряда. Необходимость повышения тактико – технических характеристик орудия поставила перед внутренней баллистикой ряд новых задач, которые не могут быть решены в рамках классического подхода.

Главная цель артиллерии состоит в повышении скорости снаряда. И для повышения различных параметров, требуется точная и пригодная математическая модель.

1. Теоретические основы классической и эстафетной схемы метания

1.1. Актуальные вопросы систем выстрела

Развитие систем артиллерийского вооружения, является основной частью построения боевой мощи. И умы как отечественных [28] [17] [11] [3] [2], так и зарубежных [27] были направлены на улучшение артиллерийских орудий и различных параметров баллистической пороховой системы.

Тут и приходит на помощь создания математической модели процесса запуска, ведь для того, чтобы протестировать ту или иную схему метания, тратится огромное количество материальных и временных ресурсов. Благодаря созданной математической модели, можно изучить внутрибаллистические процессы, что позволит найти закономерности работы новых схем и предложить новые требования к проектированию схемы разгона начальной скорости запускаемого элемента. Важным вопросом на этом этапе является повышение эффективности системы параметров, сопровождающие запускаемый снаряд. Данная проблема обычно решается путем усовершенствования существующей классической схемы стрельбы, но предлагаются и принципиально новые схемы.

В случае усовершенствования существующего положения об огнестрельном оружии исследуются возможные изменения, связанные с увеличением заряда при сохранении давления на дне канала, а также по всей области заряда.

1.2. Физические основы процесса стрельбы

В момент выстрела из ствола происходит горение пороха, благодаря чему высвобождается тепловая энергия, которая преобразуется в механическую работу. Эта тепловая энергия расходуется на сообщение снаряду, заряду и откатным частям орудия кинетической энергии, а также для преодоление

различных вредных сопротивлений. Полученное тепло впитывается стенками канал ствола, оставшиеся тепло выбрасывается в атмосферу. Для описания физических процессов, изучим основные уравнения баллистики и необходимые связи.

1.3. Закономерности газообразования и Геометрический закон

Повышения давления в камере орудия зависит от части сгоревшего пороха и скорости сгорания.

Обозначим через ψ отношение веса сгоревшего заряда $\omega_{\text{сг}}$ к первоначальному ω , т.е. $\psi = \omega_{\text{сг}}/\omega$, то основной задачей при рассмотрении горения заряда является нахождение закона газообразования или скорости газообразования

$$\psi = \psi(\tau) \text{ или } d\psi/d\tau$$

Впервые сформулирован и введен во внутреннюю баллистику Геометрический закон газообразования впервые введен и сформулирован во внутреннюю баллистику в 1890 году, французским инженером Вьелем Основные положения этого закона заключаются в следующем:

- пороховой заряд мгновенно воспламеняется по всей поверхности;
- порох сгорает одновременно и со всеми слоями, и с одной и той же скоростью во все стороны;
- все зерна пороха идентичны по своим свойства, размерам, и массе;

Формула(1) скорость газообразования

$$\frac{d\psi}{d\tau} = \frac{S}{\Lambda_1} \sigma(\psi) u(p) \quad (1)$$

где отношение $\frac{S}{\Lambda_1}$ называется оголенностью порохового зерна.

Таким образом, для получения зависимости ψ от времени необходимо:

- Знание закона изменения горячей поверхности;

– Изучение закона изменения скорости горения от условий горения.

Таким образом данный закон позволяет устанавливать связь между толщиной сгоревшей части пороха $z = \frac{e}{e_1}$, сгоревшей части зерна ψ и поверхностью зерна $\sigma(\psi)$ или $\sigma(z)$.

1.4. Уравнение энергии

Для того чтобы определить количество энергии, которое вырабатывается при сжигания пороха, нужно осуществлять это в замкнутом объеме.

$$Q = \omega\psi \int_0^{T_v} c_1 dt \quad (2)$$

В соответствии первому закону термодинамики, можно записать

$$\omega\psi \int_0^{T_v} c_1 dt - \omega\psi \int_0^{T_v} c_1 dt = \int_0^{l_{CH}} S_{CH} p dl + \Delta Q_{CH} l \quad (3)$$

Здесь ΔQ – тепловые потери. Правая часть — это сумма совершенных внешних работ на пути снаряда l_{CH} и потери энергии на теплоотдачу.

Отношение является термическим коэффициентом полезного действия выстрела.

$$\frac{\varphi_{э} q \frac{v_{Д}^2}{2}}{\frac{f\omega}{\theta}} = 1 - \frac{T_{Д}}{T_v} = \frac{v_{Д}^2}{v_{ПР}^2} = r_{Д} \quad (4)$$

1.5. Уравнение движения снаряда

Поступательное движение снаряда записывается в виде уравнением

$$q \frac{dv_{CH}}{dt} = S_{CH} P_{CH} - F \quad (5)$$

где F – сила сопротивления. В «классической» внутренней баллистике принимают

$$F = k_1 q \frac{dV_{CH}}{dt} \quad (6)$$

Игнорируем относительную и абсолютную скоростью метаемого элемента, при этом заменяем величину давления на дно канала средним давлением $p = \varphi p_{CH}$

$$\varphi(1 + k_1)q \frac{v_{CH}^2}{2} = \int_0^{l_{CH}} p dl S_{CH} \quad (7)$$

1.6. Уравнение состояния пороховых газов

Уравнение состояния определяет функциональную зависимость между плотностью газа ρ или удельным объемом $V = 1/\rho$, давлением p и его абсолютной температурой T (8):

$$F(p, V, T) = 0. \quad (8)$$

Для обыкновенных давлений и температур(9)

$$pV = RT, \quad (9)$$

Для произвольной массы газа ω , занимающего объем W , (10)

$$pW = \omega RT. \quad (10)$$

Уравнение реального газа (11)

$$\left(P + \frac{\beta}{V^2}\right)(V - a) = RT \quad (11)$$

Для замкнутого объема W_0 при отсутствии внешних работ и тепловых потерь, при полном сжигании пороха массой ω , уравнение запишется в виде формулы (12)

$$P_m = \frac{\omega RT_0}{W_0 - a\omega} \quad (12)$$

В этом случае достигается максимальное давление в объеме W_0 .

Формула для наибольшего давления пороховых газов в постоянном объеме(13)

$$P_m = \frac{f\Delta}{1-a\Delta} \quad (13)$$

где $\Delta = \omega / W_0$ – плотность заряжания.

1.7. Уравнение Резаля

$$W_\Psi = W_{KM} - \frac{\omega}{\delta} (1 - \Psi) - a\omega\Psi \quad (14)$$

Формула уравнение Резаля (14) представляет из себя взаимосвязь давления, характеристиками заряда, скоростью метаемого элемента, и путем.

1.8. Основная задача внутренней баллистики

Основной задачей внутренней баллистики является нахождение закона изменения давления газов и быстроты пули, а также нахождение рациональных конструктивных данных канала ствола и условий заряжания, при которых пуля заданного калибра и массы приобретает заданную скорость.

Впервые математически решение было получено Н.Ф. Дроздовым[6] в 1903 году. Большим шагом вперед стало создание М. С. Горохом в 1940 году[5] обобщенного метода Н.Ф. Дроздова с помощью таблицы вспомогательных функций, на основе которого разработано решение обратной задачи внутренней баллистики – одного из важнейших элементов теории баллистического проектирования.

Следует отметить, что все известные аналитические решения основной задачи, на которых основан геометрический закон газообразования, являются

либо аналогиями метода Н.Ф. Дроздова, либо упрощенными зависимостями, по сравнению с которыми метод Н.Ф. Дроздова является более простым и в то же время более совершенным.

Приведем полную систему уравнений внутренней баллистики в осредненных параметрах(15–20)

$$\frac{d\psi}{dt} = \sqrt{k^2 + 4k\lambda\psi} \frac{P}{I_k} \quad (15)$$

$$\frac{dV_{CH}}{dt} = \frac{S_{CH}P_{CH}}{q} \quad (16)$$

$$\frac{dl_{CH}}{dt} = V_{CH} \quad (17)$$

$$P \left[S_{CH}l_{CH} + W_{KM} - a\omega\psi - \frac{\omega}{\delta}(1 - \psi) \right] = a\omega\psi - \frac{\theta}{2}\varphi q V_{CH}^2 \quad (18)$$

$$P \left[S_{CH}l_{CH} + W_{KM} - a\omega\psi - \frac{\omega}{\delta}(1 - \psi) \right] = \omega\psi f \quad (19)$$

$$\varphi = a + b \frac{\omega}{q}, P = \varphi P_{CH} \quad (20)$$

Начальные условия:

$$t = 0, P = P_\phi, T = T_v, V_{CH} = 0, l_{CH} = 0, \psi = \psi_0$$

Система обыкновенных дифференциальных уравнений может быть решена одним из численных методов[1], методом Рунге–Кутты.

Где:

ε — полная работа, совершаемая газами;

a —коэффициент, учитывающий потери энергии газа на трение ведущую пояска о боевые грани нарезов, вращение снаряда и откат орудия;

b — коэффициент, учитывающий потери энергии газа на перемещение газо–пороховой смеси;

Так как при $t=0$ $l=0$; $v=0$; $p=p_0$, то, $\sigma=1-2\lambda z$ и $\frac{d\psi}{dz} = \kappa\sigma$ получаем формулу(21)

$$\psi_H = \frac{\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{p_2}}{\frac{f}{P_\phi} + a - \frac{1}{p_2}}; z_H = \frac{2\psi_H}{\kappa_1(1+\sigma_H)}; \sigma_H = \sqrt{1 + 4 \frac{\lambda_1}{\kappa_1} \psi_H} \quad (21)$$

Необходимо проинтегрировать систему уравнений в процессе движения метаемого элемента по каналу.

Система уравнений решается методом Рунге – Кутты. Начальное значение шага интегрирования τ можно выбрать

$$\tau = 0.2597e-4$$

Если в качестве начальных условий принять

$$t = 0, P = P_m, T = T_v, V_{CH} = 0, l_{CH} = 0, \psi = 1$$

то приходим к задаче Лагранжа, формула (22–26) о разгоне снаряда предварительно сжатым газом с известными параметрами в термодинамическом приближении

$$\frac{dV_{CH}}{dt} = S_{CH}P_{CH} \quad (22)$$

$$\frac{dl_{CH}}{dt} = V_{CH} \quad (23)$$

$$P[S_{CH}l_{CH} + W_{KM} - a\omega] = \omega\psi f - \frac{\theta}{2}\varphi qV_{CH}^2 \quad (24)$$

$$P[S_{CH}l_{CH} + W_{KM} - a\omega] = \omega\psi f \quad (25)$$

$$\varphi = a + b\frac{\omega}{q}, P = \varphi P_{CH} \quad (26)$$

Приняв в качестве независимой переменной длину пути, пройденного снарядом, можно получить решение системы уравнений в квадратурах (27).

$$V_{CH} = v_{IP} \sqrt{1 - \left(\frac{W_{KM} - a\omega}{S_{CH}l_{CH} + W_{KM} - a\omega}\right)^\theta} \quad (27)$$

Если в качестве начальных значений принять значения параметров газа в момент полного сгорания заряда

$$t = t_k, P = P_k, T = T_k, V_{CH} = V_k, l_{CH} = l_k, \psi = 1,$$

то решение ОЗВБ после конца горения заряда примет вид формула (28)

$$V_{CH} = v_{IP} \sqrt{1 - \left(1 - \frac{v_k^2}{v_{IP}^2}\right) \left(\frac{S_{CH}l_{CH} + W_{KM} - a\omega}{S_{CH}l_{CH} + W_{KM} - a\omega}\right)^\theta} \quad (28)$$

1.9. Задача о распаде произвольного разрыва

«Задача о распаде произвольного разрыва – задача о построении аналитического решения нестационарных уравнений механики сплошной среды в применении к распаду произвольного разрыва. Она часто возникает в широком круге задач механики сплошной среды, где в непрерывном потоке образуются разрывы, а также задач, где разрывы изначально имеют место в распределении физических параметров среды. Эта задача была решена Н.Е. Кочиным в работах, относящихся к 1924–1925 годам и сыграла и продолжает играть важную роль не только в газовой динамике, но и во всей механике сплошных сред.» [7]

Проблема заключается в следующем. При $t=0$ область пространства (x, y, z) вдоль $x < 0$ заполнена однородным газом с параметрами вектора скорости v (с компонентами v_x, v_y, v_z), давление p плотность и удельная внутренняя энергия и (в зависимости от плотности и давления) v_0, p_0, ρ_0, e_0 , а диапазон $x > 0$ представляет собой однородный газ с в общем случае различными параметрами v_1, p_1, ρ_1, e_1 . Соотношения между этими параметрами обычно произвольны. Необходимо определить движение газа при $t > 0$. Предполагается, что газ невязкий, нетепловой и идеальный, т.е. обычный разреженный газ с внутренней энергией $e = \frac{1}{\gamma-1} \frac{p}{\rho}$ $\gamma = \text{const}$. Если исходные данные (соотношения между параметрами v_0, p_0, ρ_0, e_0 и v_1, p_1, ρ_1, e_1) произвольны, то этот разрыв перестает существовать со временем и должен распадаться.

Движение, возникающее при распаде любого разрыва, является автомодельным, т.е. безразмерные параметры $v/a_0, p/p_0, \rho/\rho_0, e/e_0$, e – это функции переменной $x/(a_0 t)$ ($a = \sqrt{dp/d\rho}$ – скорость звука) и постоянных параметров $v_0/a_0, v_1/a_0, p_1/p_0, \rho_1/\rho_0, e_1/e_0$. Решения, зависящие от x/t , хорошо известны. Это центрированные волны Римана и ударные волны. К этим нетривиальным решениям уравнений газовой динамики, распространяющимся

сквозь газ, необходимо добавить тангенциальные разрывы, где должны выполняться условия непрерывности давления и нормальной составляющей скорости газа

$$[p]=0, [vx] = 0.$$

Скобки показывают изменение (скачок) значения в скобках при пересечении разрыва. Тангенциальный разрыв не накладывает никаких ограничений на $[vy]$ и $[vz]$. Если $[vy]=0$ и $[vz]=0$, то разрыв называется контактным разрывом.

В римановых и ударных волнах изменяются ρ , vx и p , причем изменения этих величин связаны друг с другом, т.е. изменения ρ и vx можно рассматривать как функции изменений p . Величины vy и vz в указанных волнах не меняются, оставляя тангенциальный разрыв в газе с начальными разрывами $[vy]$ и $[vz]$ неизменными, т.е. совпадающими.

«Таким образом, решение задачи о распаде произвольного разрыва должно состоять из центрированных волн Римана и ударных волн, подобранных так, чтобы на месте начального разрыва остался тангенциальный разрыв на котором выполняются равенства.» [7]

Н. Е. Кочин использовал, во-первых, то, что для римановых волн значения x/t , соответствующие волне, характерны для уравнений газовой динамики, и, во-вторых, то, что в состоянии, следующем за ударной волной, характеристики достигают ударной волны. Поэтому можно сказать, что только одна волна – ударная волна или центрированная волна Римана – может распространяться через газ в каждом направлении от тангенциального разрыва. Другими словами, «первая ударная волна распространяется через газ сзади со скоростью меньше скорости звука, вторая ударная волна распространяется через газ спереди со скоростью, превышающей скорость звука, а волна Римана распространяется со скоростью, равной скорости звука.» [7] Это невозможно в автомобильном движении. Когда центрированная риманова волна распространяется через газ, ее фронт сопротивления движется через газ со

скоростью звука, а ударная волна, которая следует за ней, распространяется со скоростью, превышающей скорость звука (на частицах газа перед волной). Если за волной Римана следует другая волна Римана, то ширина однородной зоны, разделяющей две волны, остается постоянной (поскольку скорости волн Римана равны друг другу), что также невозможно в случае автомеханических движений. Это приводит к следующему результату.

Теорема [9]. Для распада произвольного разрыва возможны только три различные волновые конфигурации

«1. имеет место тангенциальный разрыв и в каждую сторону от него распространяется одной ударной волне;

2. по одну сторону от тангенциального разрыва распространяется ударная волна, а по другую – центрированная волна Римана;

3. в обе стороны от тангенциального разрыва распространяется по одной центрированной волне Римана.» [7]

Во всех этих случаях в пространстве между расходящимися волнами, включая поверхность тангенциального разрыва, образуется область, занятая газом с постоянными значениями давления и скорости, где в общем случае плотность газа претерпевает разрыв.

Для расчета параметров расходящихся волн исследовалась зависимость изменения величин v_x и p от римановой волны, при которой p уменьшается (после прохождения римановой волны давление p меньше, чем до ее прохождения), и зависимость изменения этих величин от ударных волн, при которых p увеличивается. В плоскости v_x , p существование таких соотношений приводит к тому, что значения v_x и p после прохождения (римановой или ударной) волны принадлежат кривой, проходящей через точку, соответствующую начальным значениям v_x и p . Такое построение может быть выполнено по обе стороны от рассматриваемого начального разрыва. Пересечение построенных кривых гарантирует выполнение условий тангенциального разрыва и позволяет найти значения v_x и p в их окрестности,

тем самым определяя характер и интенсивность волн, распространяющихся с обеих сторон.

В случае разрушения разрыва с образованием двух римановых волн одна газовая масса может быть отделена от другой. Это происходит, когда модуль разности начальных нормальных скоростей достаточно велик. В этом случае во время расширения газы не могут заполнить область, образованную в точке разрыва, и между фронтами расширяющихся газов образуется вакуумная зона.

Приведенные ниже рисунки показывают, что решение одного из перечисленных ниже типов образуется в момент времени, отличный от начального. Пунктирная линия указывает на тангенциальный прорыв;

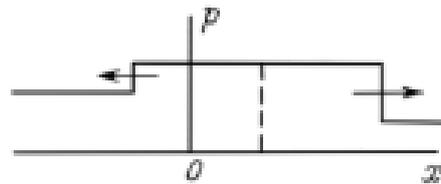


Рисунок 1

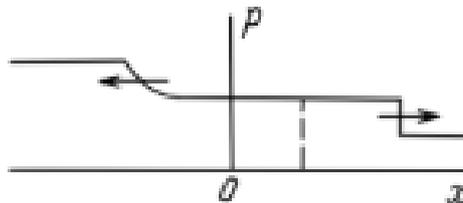


Рисунок 2

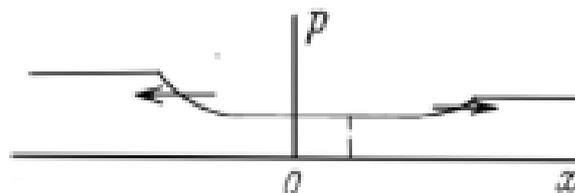


Рисунок 3

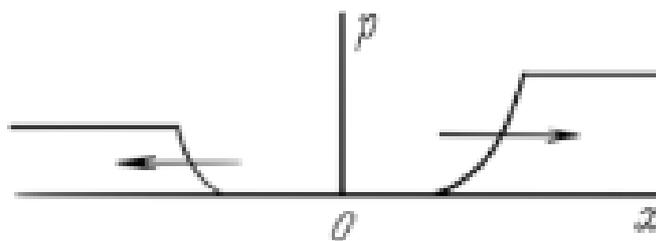


Рисунок 4

На рисунка(1-4) изображено четыре возможных случая распада. «Распад произвольного разрыва на две ударных волны происходит, например, если начальные значения параметров отличаются лишь направлением скорости и скорости направлены к поверхности раздела (задача о симметричном соударении двух масс газа). Распад на ударную волну и волну Римана возникает, например, если газы по обе стороны от разрыва в начале покоятся, но имеют разное давление (задача о выравнивании давления). Распад произвольного разрыва на две волны Римана имеет место, например, если при одинаковых начальных давлении и плотности начальные скорости направлены от поверхности разрыва (задача о разлете двух масс газа).» [7]

«Задача о распаде произвольного разрыва это не только решение задачи с начальными данными, но также решение задач о столкновении ударных волн, которое возможно при их встречном и попутном движении, а также задачи столкновения ударной волны с тангенциальным разрывом.» [7]

1.10. Описание классической схемы метания

«Классическая схема стрельбы связана с непосредственным процессом артиллерийской стрельбы. Все процессы, происходящие внутри ствола, от механического воздействия на затравку до выхода снаряда из дула, рассматриваются внутренней баллистикой. Предполагается, что при ударе о

грунтовку первый слой пороха на дне зоны заряда немедленно воспламеняется, и начинается процесс преобразования пороха в высокотемпературный газ.

С течением времени пороховой заряд продолжает гореть и выделять все больше и больше газов, так что давление пороховых газов сжимает стенки области и, следовательно, на дно инертного тела, т.е. снаряда.

Под воздействием этого давления пуля начинает двигаться в стволе.» [26][16]

Объем пороховых газов за пулей увеличивается все больше и больше по мере продолжения процесса сгорания пороха, пока не сгорит весь заряд.

Затем наступает момент, когда давление газа в камере начинает уменьшаться, поскольку объем области, которую может занять этот газ, увеличивается с расстоянием, которое пуля проходит в стволе.

Как только основание снаряда выходит из дула, система больше не является замкнутой и не описывается внутренней баллистикой. Процесс может быть описан как адиабатический.

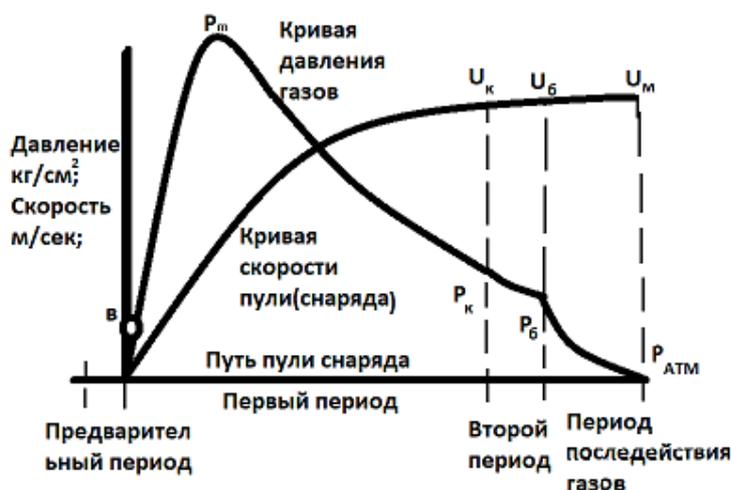


Рисунок 5

Процесс горения делится на четыре фазы. Деление на периоды основано на возможности математических расчетов значений давления газа и скорости снаряда для каждого из периодов. Рисунок(5) демонстрирует данные процессы.

В течение первого периода начинается сгорание первого слоя заряда, и этот период продолжается по мере движения снаряда.

В течение первого периода происходит расходование порохового заряда и процессы, действующие на движущийся снаряд. Конец периода наступает, когда пороховой заряд полностью сгорает.

Второй период начинается с момента окончания первого периода до момента выхода пули из орудия.

Последний период описывает покинувший снаряд и воздействие на него пороховых газов.

Классический выстрел и возможности модернизации обсуждались в работах авторов [26][16]. В основном, решение заключается в увеличении максимального давления на дне ствола, увеличении плотности заряда, увеличении энергии пороха или пороховой смеси, уменьшении массы продуктов сгорания пороха, увеличении расстояния, проходимого пулей в стволе, и внедрении новых способов получения энергии от пороха или пороховой смеси за счет уменьшения массы продуктов сгорания пороха. Основная проблема этих подходов к модернизации классической схемы стрельбы заключается в том, что в этих условиях увеличение скорости пули, вылетающей из ствола, не может превышать 3–5%. Сама система погрузки подвержена критическим ограничениям из-за огромных потерь энергии погрузки на вспомогательные операции.

1.11. Предпосылки к эстафетной схеме

Эта исходная задача была впервые сформулирована В. Н. Вилуновым [4]. Эта работа была опубликована в 1969 году. Основной целью данного исследования было использование исходной схемы «порох ↔ поршень ↔ порох» (ППП).

Этот принцип был назван «эстафетным». Главной особенностью было то, чтобы воздействовать как поршень, так и сам снаряд. Благодаря чему удалось повысить скорость снаряда.

Следует отметить, что при эстафетном выстреле ПБУ движущийся поршень позволяет снаряду, который начал свое движение вместе с поршнем, перераспределить и передать свою энергию. Это имеет большое значение, именно этим система и отличается от традиционных двухступенчатых систем

Эта схема может быть использована для ускорения снаряда в системах с ограниченной длиной снарядной канала, из-за своей способностью перераспределять энергию. Это полезное свойство может быть применено в соответствующих комплексах и помогает создать конфигурация, отвечающая возможным требованиям к размерам оружия.

Само название указывает на метод, используемый в этой системе. Сначала зажигается основной заряд, а после короткой задержки поджигается другой заряд. Рассмотрим, как работает эта система:

1. Поджигается основной заряд от воспламенителя.
2. Как только давление достигает точки ускорения, поршень приходит в движение;
3. После задержки зажигается вспомогательный заряд воспламеняется от раскаленных продуктов сгорания основного заряда. Время задержки заряда в корпусе может регулироваться диаметром отверстия в поршне.
4. До момента воспламенения ускоряемого дополнительного заряда, энергия порохового газа основного заряда будет преобразовываться в кинетическую энергию толкаемой сборки контейнера. В конечном итоге это должно вызывать увеличение скорости движения метаемого газа.
5. При воспламенении движущейся контейнера с дополнительным зарядом происходит ускорение пылевых газов, образующихся в контейнере между поршнем и снарядом. Это ускорение во много раз превышает ускорение самого поршня за счет расширения газов основного заряда. В конце этого процесса снаряд отделяется от основного заряда и начинает двигаться по

стволу. Поршень замедляется под действием расширения газов под действием газов второго, но прекращает свое движение только тогда, когда давление с обеих сторон уравнивается.

При использовании этой схемы поджигания достигается значительное повышение эффективности основной части заряда возрастает по мере ускорения большой массы под его действием. Эффективность всей системы стрельбы значительно повышается, так как контейнерный заряд и снаряд в момент выстрела уже находятся в движении.

Если сравнить эту систему с традиционным методом, то можно ожидать увеличение скорости снаряда можно ожидать из-за иного распределения энергии. Поэтому данный принцип также называют «эстафетным» принципом метания.

В данном разделе были изучены физические основы процесса метания. Была описана основная задача внутренней баллистики и рассмотрен метод произвольного разрыва. Разобраны используемые основные законы и уравнения, были описаны принципы работы классической и эстафетной схемы метания.

2. Математическая модель эстафетной схемы

2.1. Описание эстафетной схемы

В этом разделе мы опишем работу системы выбранной модели выстрела с дополнительным зарядом, прикрепленным к снаряду, на основе схемы газопорошковой смеси.

В начальный момент времени воспламеняется (первый) основной заряд, расположенный в первой расчетной зоне. Расчетное давление, создаваемое при сгорании заряда, запускает систему.

Снаряд с дополнительным зарядом в контейнере приводится в движение толкаемым поршнем. Поэтому все расчеты выполняются в основной области до тех пор, пока дополнительный заряд не воспламенится.

В момент времени, соответствующий заданной задержке зажигания второстепенного заряда, выполняется системный расчет для обработки этого заряда. Вторая зона между подвижным поршнем и снарядом должна быть включена в расчет системы, между подвижным поршнем и снарядом.

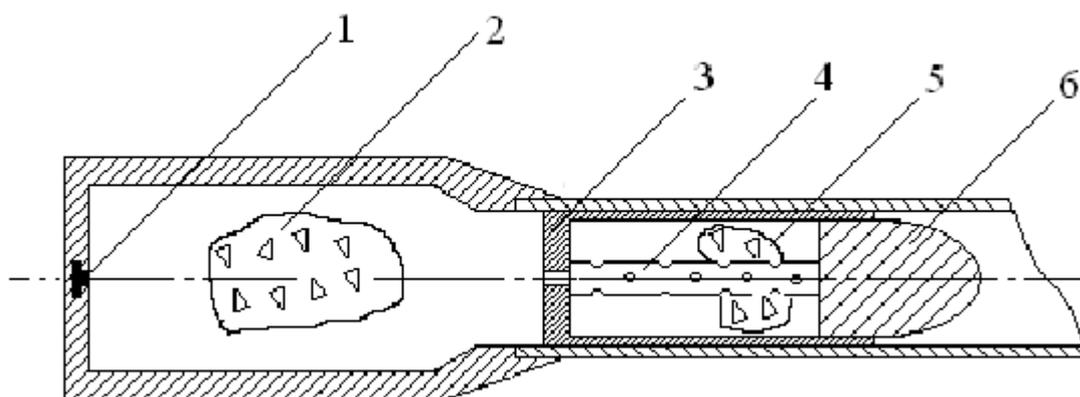


Рисунок 6– Схема эстафетной установки с присоединённым зарядом.

Где: 1 – капсуль–воспламенитель; 2 – основная часть заряда; 3 – поршень; 4 – перфорированная трубка; 5 – дополнительная часть заряд; 6 – снаряд.

«Схема метания с невесомыми, убирающимися при определенных условиях разделительными перегородками, имеющими возможность движения метаемого элемента, рассмотрена в работе» [8].

Для достижения высокой скорости в начальный момент метаемого элемента, «предлагается разгонять камеру подгона или контейнер и воспламенить его пороховой заряд с некоторой задержкой после воспламенения основного заряда» [21]

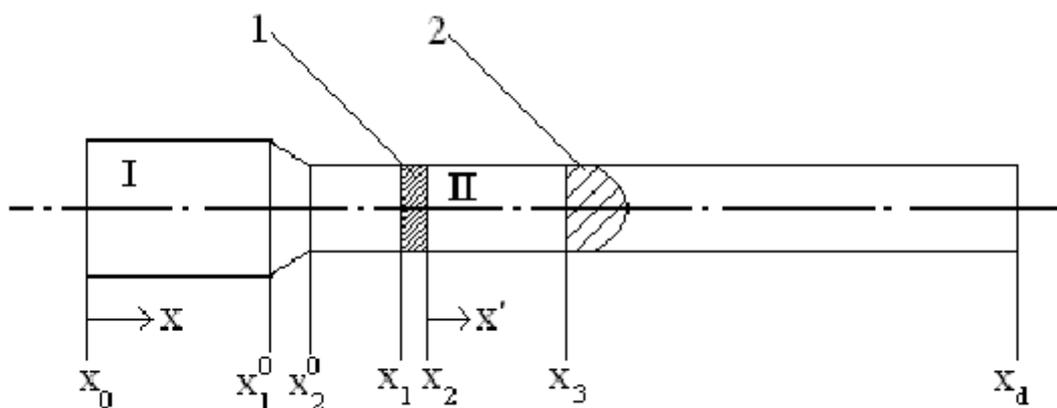


Рисунок 7– Расчётная схема эстафетной установки с дополнительным зарядом

Где: 1 – поршень; 2 –снаряд.

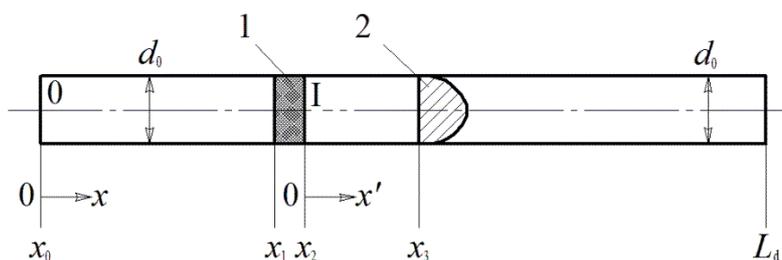


Рисунок 8– Схема «эстафетного» выстрела с зарядом, разделённым на две части (бинар)

Где: 0, I– области; 1 – перегородка; 2 –снаряд; d_0 – диаметр; L_d – длина ствола с учётом длины патронника.

Для моделирования "эстафетной" схемы стрельбы используется подход двухфазной двухскоростной среды. Модель "эстафетной" системы основана на следующих допущениях:

- «← движение фаз одновременно;
- теплоотдача к горячей поверхности зерен не учитывается (скорость движения тепловой волны в порохе равна скорости горения);
- частицы материала несжимаемы;
- параметры газа внутри и снаружи порошковых элементов в этом разделе одинаковы;
- поверхность частиц заряда мгновенно охватывается пламенем в соответствующее время для соответствующего воспламенения каждой частицы заряда;
- диафрагма, вспомогательного заряда и метательного элемента - начинается после достижения давления сборки;
- сопротивление воздуха в стволе и трение при прохождении элементов через ствол не учитываются;
- к частицам пороха элементов снаряда применяется обычный геометрический закон горения;
- до момента разделения сборки частицы дополнительного заряда неподвижны по отношению к сборке;
- после разделения сборки, потоки газа между областями 0 и I не рассматриваются.» [18]

«Для описания процессов в области 0 используется система уравнений, записанных в инерционной системе координат (0-x). Система уравнений для области I в свою очередь записывается в неинерциальной системе координат (0'-x'), связанной с диафрагмой (рис. 7).» [18]

2.2. Модели газопороховой и двухскоростной сред

«Решение ПЗВБ для систем ускоренной сборки контейнеров реализуется при основных допущениях:

- заряды состоят из зерен мелкого иницирующего состава, и зерна движутся с той же скоростью, что и окружающие газы;
- поверхность каждого заряда немедленно охватывается пламенем в момент воспламенения;
- трением газа о стенки гильзы и ствола пренебрегают [25] как и рассеиванием тепла;
- движение сборки (заслонка, вспомогательный заряд, снаряд) начинается после достижения давления форсирования в основной камере;
- к зернам применяется обычный геометрический закон горения;
- поток газа в зоне сборки не учитывается;» [18]

Кинематические переменные поршня–перегородкой можно выразить в терминах переменных, связанных с нижней частью канала. Обозначим новые параметры в неинерциальной системе отсчета, штрихом, получаем формулу (29):

$$x' = x - \int_0^t v dx - x_0, u' = u - v, t' = t. \quad (29)$$

В этом случае изменятся дифференциальные операторы по новым независимым переменным, формула (30) выглядит следующим образом

$$\frac{d}{dx'} = \frac{d}{x}, \frac{d}{dt'} = \frac{d}{dt} - v \frac{d}{dx}. \quad (30)$$

Далее, после опускания штрихов в обозначениях новых переменных, будем иметь следующую систему уравнений (31-36):

$$\frac{dpS}{dx'} + \frac{dpuS}{dx} = 0; \quad (31)$$

$$\frac{dpuS}{dt} + \frac{dpu^2}{dx} + S \frac{dp}{dx} = -pS \frac{dv}{dx}; \quad (32)$$

$$\frac{dpuS}{dt} + \frac{dpuS}{dx} + pv \frac{dS}{dx} + p \frac{dSu}{dx} = S \Pi p \left(\frac{d\psi}{dt} + u \frac{d\psi}{dx} \right); \quad (33)$$

$$\frac{d\psi}{dt} + u \frac{d\psi}{dx} = \sqrt{\chi^2 + 4\chi\lambda\psi} \frac{p}{I_k}; \quad (34)$$

$$\psi = \chi z (1 + \lambda z); \quad (35)$$

$$\varepsilon = \frac{p}{k-1} \left(\frac{1}{p} - \frac{1-\psi}{\delta} - a\psi \right). \quad (36)$$

Данную систему можно использовать для вычислений как в области I, так и в области II. Представленную систему можно преобразовать в систему уравнений в системе координат.

Начальные и граничные условия:

1. При $t = 0, 0 \leq x \leq x_1$

$$u_I = 0, p = p_\phi, \tilde{\rho} = \Delta_I, \psi = \psi_I = \frac{\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{\delta_I}}{\frac{f_I + \alpha_I - \frac{1}{\delta_I}}{p_I}}. \quad (37)$$

2. При $t=0, x_2 \leq x \leq x_3$:

$$u_{II} = 0, p_{II} = p_a, \tilde{\rho} = \Delta_{II}, \psi_I = 0.$$

3. При $t=t_3, x_2 \leq x \leq x_3$:

$$u_{II} = 0, p_I = p_B, \tilde{\rho} = \Delta_{II}, \psi_{II} = \frac{\frac{1}{\Delta_{II}} - \frac{1}{\delta_{II}}}{\frac{f_{II} + \alpha_{II} - \frac{1}{\delta_{II}}}{p_{II}}}. \quad (38)$$

4. При $x = 0, t \geq 0$

$$u = 0$$

5. При $x = x_1, t \geq 0$

$$\frac{du_1}{dt} = \begin{cases} \frac{S}{Q} \left(p_1 - \frac{f_{CB}}{S} \right), & \frac{p_1 - p_2}{Q_\Gamma} \geq \frac{p_3}{q} \\ \frac{S(p_1 - p_2)}{Q_\Gamma}, & \frac{p_1 - p_2}{Q_\Gamma} < \frac{p_3}{q} \end{cases} \quad (39)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{du_1}{dt} \quad (40)$$

6. При $x=x_2, t \geq 0$;

$$u_2 = 0$$

7. При $x=x_3, t \geq 0$

$$\frac{du_3}{dt} = \begin{cases} 0, & \frac{p_1 - p_2}{Q_\Gamma} \geq \frac{p_3}{q} \\ \left\{ \frac{S(p_3 - f_{CB}/S)}{q} \right\} - \frac{dv}{dt}, & \frac{p_1 - p_2}{Q_\Gamma} < \frac{p_3}{q} \end{cases} \quad (41)$$

$$f_{CB} = \left(p_{BH} + \frac{k+1}{2} p_{BH} u^2 \right) S \quad (42) \text{ – по формуле прямого скачка}$$

Для решения система уравнений приводится к безразмерному виду(43-44.

В качестве масштабных величин выбраны: $L_{KM} = x_1, t_0 = L_{KM}$,

$$P_0 = \frac{f_1 \Delta_1}{1 - a_1 \Delta}, c_0^2 = \frac{p_0}{\Delta}, \Delta = \frac{\omega_1}{w_1}, \frac{\omega_1}{w_1} \geq \frac{\omega_{II}}{w_{II}} \quad (43)$$

$$P_0 = \frac{f_{II} \Delta}{1 - a_{II} \Delta}, c_0^2 = \frac{p_0}{\Delta}, \Delta = \frac{\omega_{II}}{w_{II}}, \frac{\omega_1}{w_1} < \frac{\omega_{II}}{w_{II}} \quad (44)$$

Здесь x_1 —начальная координата положения поршня; ω_1, ω_{II} — массы составов в областях; w_1, w_{II} — объёмы областей; L_{KM} —масштаб длины; t_0 — масштаб времени; p_0 — масштаб давления; c_0 — масштаб скорости. Тогда относительные переменные примут вид:

$$\tau = \frac{t}{t_0}, \bar{u} = \frac{u}{c_0}, \bar{x} = \frac{x}{L_{KM}}, \bar{p} = \frac{p}{p_0}, \bar{p} = \frac{p}{\Delta}, \bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{c_0^2}.$$

Для простоты введем следующие замены:

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

Переходя в исходной системе уравнений начальных и граничных условиях к относительным переменным, с учетом замен, получим уравнения(45-46):

$$\frac{dp}{d\tau} + \frac{dp u}{dx} = 0 \quad (45)$$

$$\frac{dM}{d\tau} + \frac{dMu}{dx} + S \frac{dp}{dx} = -p \frac{dv}{d\tau}; \quad (46)$$

$$\frac{d\varepsilon}{d\tau} + \frac{d\varepsilon u}{dx} + p \frac{dsu}{dx} = p \Pi \left(\frac{d\psi}{d\tau} + u \frac{d\psi}{dx} \right) - p v \frac{ds}{dx}; \quad (47)$$

$$\frac{d\psi}{d\tau} + u \frac{d\psi}{dx} = \sqrt{\chi^2 + 4\chi\lambda\psi A}; \quad (48)$$

$$\psi = xz (1 + \lambda z); \quad (49)$$

$$\varepsilon = \frac{p\rho}{\theta} \left(\frac{S}{p} - \frac{1-\psi}{\delta} - a\psi \right) \quad (50)$$

$$\text{Где } \theta = k-1, A = \frac{\Delta L_{KM} c_0}{I_k} \quad (51)$$

Начальные и граничные условия.

1. При $\tau=0, 0 \leq x \leq 1$

$$u_1 = 0, p_1 = \Delta_1 S, p_1 = p_\phi, \psi_1 = \frac{\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{\delta_1}}{\frac{f_1}{p_1} + \alpha_1 - \frac{1}{\delta_1}}. \quad (52)$$

2. При $\tau=0, x_2 \leq x \leq x_3$

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

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

$$u_{II} = 0, p_{II} = p_B, p_{II} = \Delta_{II} S, M_{II} = p_{II} u_{II}, \psi_I = \frac{\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{\delta_{II}}}{\frac{f_{II}}{p_{II}} + \alpha_{II} - \frac{1}{\delta_{II}}}. \quad (53)$$

4. При $x=0, \tau \geq 0; u=0.$

5. При $x=x_1, \tau \geq 0,$

$$\frac{du_1}{dt} = \begin{cases} \frac{B}{Q} \left(S p_1 - \frac{f_{CB}}{S_{KM}} \right), \frac{p_1 - p_2}{Q_{\Gamma}} \geq \frac{p_3}{q} \\ \frac{B}{Q} (S(p_1 - p_2)), \frac{p_1 - p_2}{Q_{\Gamma}} < \frac{p_3}{q} \end{cases} \quad (54)$$

$$\frac{dv}{d\tau} = \frac{du_1}{d\tau} \quad (55)$$

6. При $x=x_2, \tau \geq 0; u_2=0.$

7. При $x=x_3, \tau \geq 0,$

$$\frac{du_3}{dt} = \begin{cases} 0, \frac{p_1 - p_2}{Q_{\Gamma}} \geq \frac{p_3}{q} \\ \frac{B}{q} \left(p_3 \frac{f_{CB}}{S_{KM}} \right) - \frac{dv}{dt}, \frac{p_1 - p_2}{Q_{\Gamma}} < \frac{p_3}{q} \end{cases} \quad (56)$$

$$B = S_{KM} \Delta L_{KM} \quad (57)$$

f_{CB} – по формуле прямого скачка

Система представленных уравнений с индивидуальными начальными

и

граничными условиями для каждой из рассматриваемых областей может быть

решена методом СЭЛ[13].

2.3. Математическая модель

«Физико–математическое моделирование «эстафетной» схемы основано на подходе механики гетерогенных среды[19][20][14][12], используемом для внутренней баллистики ствольных систем.» [18]

Используя условия задачи в предыдущем разделе можно описать процессы в двух областях, ограниченных заслонкой:

$$\frac{dpS}{dx'} + \frac{dpus}{dx} = 0 \quad (58)$$

уравнения которой записываются в собственных системах координат для каждой области. В области I в инерционной системе координат, в области II в неинерциальной системе координат.

Система уравнений, описывающих газодинамику процессы в областях I и II во время работы «эстафетной» схемы.

$$\frac{d}{dt}(ps\varphi) + \frac{d}{dx}(pus\varphi) = M; \quad (59)$$

–описывает сохранение массы газа;

$$\frac{d}{dt}(ps\varphi u) + \frac{d}{dx}(pus\varphi^2 + ps\varphi) = M\omega - \tau_{TP} + p \frac{ds\varphi}{dx} - Nps\varphi \frac{du_D}{dt}; \quad (60)$$

–описывает сохранение импульса газа;

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(pS\varphi E) + \frac{d}{dx}(S\varphi u(pE + p)) = M \left(Q + \frac{\omega^2}{2} \right) - \tau_{TP}\omega - p \frac{d(1-\varphi)S\varphi}{dx} - \\ - NpS\varphi u \frac{du_D}{dt}; \end{aligned} \quad (61)$$

–описывает сохранение энергии газа;

$$\frac{d}{dt}(p_2(1-\varphi)S\omega) + \frac{d}{dx}(p_2(1-\varphi)S\omega^2) + (1-\varphi)S \frac{dp}{dx} = -M \quad (62)$$

–описывает сохранение массы твердых частиц;

$$\frac{d}{dt}(p_2(1-\varphi)S) + \frac{d}{dx}(p_2(1-\varphi)S\omega) = \tau_{TP} - M\omega - Np_2(1-\varphi)S \frac{du_{II}}{dt}; \quad (63)$$

–описывает сохранение импульса твердых частиц;

$$\frac{dz}{dt} + \omega \frac{dz}{dx} = \frac{a_1 p}{e_b}; \quad (64)$$

– уравнение относительной толщины сгоревшего слоя твердых частиц;

$$P \left(\frac{1}{p} - a \right) = RT; \quad (65)$$

– уравнение состояния для модели гетерогенной среды.

$$E = \varepsilon + \frac{u^2}{2}; \quad (66)$$

$$\varphi = 1 - n \Lambda_0 (1 - \varphi(z)); \quad (67)$$

$$\psi(z) = k_1 z (1 + \lambda_1 z); \quad (68)$$

$$M = SNS_{02} p_2 \sigma(z) a_1 p; \quad (69)$$

$$\sigma(z) = 1 + 2\lambda_1 z; \quad (70)$$

$$\tau_{TP} = \frac{1}{2} C_x p (u - \omega) |u - \omega| S_n \frac{\pi d_{op}^2}{4} (1 - \psi(z))^{2/3}; \quad (71)$$

$$C_x = \begin{cases} \frac{24}{Re} + 0,48; & 0 < Re < 3 * 10^5 \\ 0.1, & Re \geq 3 * 10^5 \end{cases} \quad (72)$$

$$Re = \frac{p|u-\omega|\varphi\sqrt{S_{02}}}{\mu} \quad (73)$$

Данные уравнений описывают физические явления в области I при значениях параметров и замене параметров и переменных в инерционной системе координат на соответствующие параметры и переменные в неинерционной системе координат со штрихом, которые происходят в области II. Начальные условия для области I

$$T(x, 0) = T_G; P(x, 0) = P_\Phi; u(x, 0) = w(x, 0) = 0; \varphi(x, 0) = \varphi_H;$$

$$\psi_H = \frac{\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{p_2}}{\frac{f}{P_\Phi} - \frac{1}{p_2} + a}; Z_H = \frac{2\psi_H}{k(1+\sigma_H)}; \sigma_H = \sqrt{1 + 4 \frac{\lambda_1}{k_1} \psi_H} \quad (74)$$

Начальные условия для области II

$$T'(x', t_R) = T'(x'); p'(x', t_R) = p'(x'); u'(x', t_R) = u'(x'); w'(x', t_R) = 0$$

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

Граничные условия:

$$u(0, t) = w(0, t) = 0; u(x_D, t) = w(x_D, t) = u_D;$$

$$u'(0, t) = w'(0, t) = 0; u'(x'_s, t) = w'(x'_s, t) = u'_s;$$

x_D – текущая координата поршня заслонки в инерциальной системе;

x'_s – текущая координата элемента, в неинерциальной системой отсчета;

и u' – скорость поршня в системе координат инерциальной системе и неинерциальной соответственно;

Определяем значения этих переменных путем интегрирования

$$t \leq t_R \begin{cases} m \frac{du_D}{dt} = p_1 S \\ q'_s \frac{du'_s}{dt} = 0 \end{cases} \quad (75)$$

$$t > t_R \begin{cases} q_s \frac{du_D}{dt} = (p_1 - p_2) S \\ q'_s \frac{du'_s}{dt} = -q_s \frac{du}{dt} + p_3 S \end{cases} \quad (76)$$

где:

$p_1 p_2$ – давление пороховых газов на поршень слева, и справа соответственно

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

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

m – масса полной сборки;

q_s – масса поршня;

q'_s – масса метаемого элемента

«Разделение сборки происходит в момент времени t_R , когда ускорение поршня под действием сил давления на него станет меньше ускорения снаряда под действием сил давления на него» [18]

$$p_3 > \frac{q_s}{q_D} (p_1 - p_2) \quad (76)$$

Здесь приняты следующие обозначения:

t – время;
 x – координата;
 z – продольная координата, связанная с пороховым элементом, или относительная толщина сгоревшего свода;
 v, w – скорости движения газа и твердой фазы в канале ствола соответственно;
 c – скорость звука в газе;
 p – давление;
 T – температура;
 ρ – плотность газа;
 $\bar{\rho}$ – плотность газопороховой смеси;
 δ – плотность материала пороха;
 ε – внутренняя энергия единицы массы пороховых газов;
 ε – энтропия единицы массы пороховых газов;
 c_v, c_p – теплоемкости газа при постоянном объеме и давлении;
 T_v, T_p – температуры горения при постоянном объеме и давлении;
 $\theta = k - 1$ – показатель адиабаты;
 α – коволюм;
 R_0, R – удельная газовая постоянная и газовая постоянная;
 μ, λ – коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности продуктов горения;
 m – пористость смеси (объем пустот в единице объема);
 a – счетная концентрация зерновых пороховых элементов;
 Π – периметр;
 Ψ – относительная доля сгоревшего пороха;
 Q – теплотворная способность (потенциал) пороха;
 $f = RT_v$ – сила пороха (энергетическая характеристика пороха, имеющая смысл работы, совершаемой единицей массы газов при расширении в условиях

постоянного давления, равного атмосферному давлению, при их нагреве на T_v градусов);

A_0, S_0 – начальные объем и поверхность порохового зерна;

A_T, S_T – текущие значения объема и поверхности горения порохового зерна;

$\sigma(\Psi)$ – отношение текущей поверхности горения к первоначальной;

A_σ, S_σ – текущие ограничивающие объем и поверхность порохового зерна;

$2e_1$ – начальная толщина горящего свода;

d_0, D_0, L_0 – начальные внутренний, внешний диаметры и длина порохового элемента;

d, D, L – текущие внутренний, внешний диаметры и длина порохового элемента;

κ_p, λ_p – коэффициенты формы порохового элемента;

$d_{A\sigma}, d_{S\sigma}$ – диаметры шаров, эквивалентных зерненому элементу по текущему ограничивающему его объему и текущей ограничивающей его поверхности соответственно;

λ_w – коэффициент сопротивления порохового зерна в слое;

ξ – коэффициент сопротивления на непроницаемой поверхности;

S – переменная площадь сечения камеры и ствола;

$d_{км}, d_{кн}$ – диаметры камеры и ствола;

$W_{км}$ – объем камеры;

$L_{км}$ – длина камеры;

L_d – длина ствола;

Δ – плотность заряжания;

P_Φ – давление форсирования;

$J_k = e_1/u_1$ – полный импульс давления пороховых газов;

u_1 – скорость горения при атмосферном давлении (единичная скорость горения);

φ – коэффициент второстепенных работ;

$P_{\text{мкр}}$ – максимальное крешерное давление;

ω – масса заряда;

q – масса снаряда;

P_m – максимальное давление, развиваемое в орудии;

v_d – дульная скорость снаряда;

$l_{\text{сн}}$ – путь пройденный снарядом в стволе;

h, τ – шаги по пространству и времени в разностной схеме;

u_k – линейная скорость горения пороха;

F – реакция сил сопротивления при движении снаряда в стволе;

$\bar{\varphi}$ – среднее значение параметра φ ;

Основные индексы:

n – начальные параметры;

$кн$ – параметры дна канала

$сн$ – параметры дна снаряда;

$д$ – параметры на дульном срезе;

$с$ – параметры поверхности ствола;

m – максимальное значение параметра;»[21]

«Система уравнений (59) – (65) с соответствующими начальными и граничными условиями решается численно по методу С.К. Годунова. Для ее решения расчетные области были покрыты дифференциальной сеткой с соответствующими градациями. Потоки массы, импульса и энергии газа вдоль границ расчетных ячеек в уравнениях (59) – (61) определялись путем решения задачи затухания для произвольных параметров газа при скачке поперечного сечения[24]. В уравнениях (62) – (63) потоки массы и импульса частиц в конденсированной фазе были определены путем решения произвольной задачи разложения по разрывам для среды без "собственного" давления[10]. Уравнения (75), (76) решались методом Эйлера, где давления p_1, p_2, p_3 определялись путем решения задачи произвольного затухания параметров расстояния между газами на движущейся непроницаемой поверхности[15]. В расчетной ячейке, прилегающей к движущейся границе, параметры среды

определялись с помощью метода С.К. Годунова примененные к случаю движущейся границы ячейки[15]. Когда ячейка, прилегающая к подвижной границе, увеличивается до значения, превышающего $2h$ (где h – значение расчетной ячейки в расчетной области), она делится: целое число ячеек h и ячейка h_n , прилегающая к подвижной границе разделяются, удовлетворяя условию $h < h_n < 2h$.» [18]

«Расчетные области 0 и 1 покрываются дифференциальной сеткой с шагом h и h' соответственно.

Величина временного шага определяется условиями устойчивости системы. Условия устойчивости Куранта–Фридриха–Леви были определены для всех расчетных областей.» [18]

В данном разделе, была описана теоретическая часть «эстафетной схемы метания», а также продемонстрированы схемы, и описаны допущение при которых строится математическая модель. Была построена и описана математическая модель на подходе механики гетерогенных среды, и обозначены основные обозначения использующихся в уравнениях.

3. Программная реализация модели

3.1 Среда и язык программирования

Мною был выбран язык программирования C++ по ряду причин: именно этот язык программирования присутствует в курсе обучения по моей специальности, наличие поддержки написания программ с учетом принципов ООП, а также простота и лаконичность данного языка.

В качестве среды разработки была выбрана Visual Studio 2022 с поддержкой последней версии языка C++20. Выбор был сделан в пользу данной IDE по нескольким причинам: простота работы в данной среде разработки, глубокая поддержка языка C++, наличие всевозможных инструментов юнит-тестирования и отладки программ.

3.2 Использование OriginPro 8 для построение графиков

Origin — это простое в использовании программное обеспечение для анализа данных и построения графиков, которым пользуются более 100 000 ученых и инженеров по всему миру.

Origin — производится корпорацией OriginLab и работает под управлением Microsoft Windows.

Анализ данных в Origin включает статистику, обработку сигналов, подгонку кривой и анализ пиков. Подгонка кривой начала координат выполняется нелинейным методом наименьших квадратов, который основан на алгоритме Левенберга–Марквардта.

Origin импортирует файлы данных в ASCII, Excel, NI TDM, DIADem, NetCDF, SPC и т. д. Он экспортирует график в JPEG, GIF, EPS, TIFF и т. д. Поддерживает графики 2D/3D.

Инструмент Peak Analyzer в OriginPro предоставляет дополнительные возможности поиска и сопоставления нескольких пиков в ваших спектрах. Точки привязки базовой линии можно настраивать и использовать с подходящей функцией подбора, а подбор базовой линии можно включить как часть окончательного процесса подбора пика. Предусмотрено подробное диалоговое окно «Управление подгонкой» для управления всеми аспектами подгонки пиков, включая функции смешанных пиков, центры и ширину пиков, совместное использование параметров и наложение границ и линейных ограничений на параметры. Графические, а также табличные результаты генерируются как часть окончательного отчета о подгонке.

OriginPro может подогнать 3D–поверхность к точкам данных XYZ. Поверхность и точки данных могут отображаться вместе, включая линии от точек к поверхности.

OriginPro расширяет возможности статистического анализа Origin, предоставляя дополнительные инструменты описательной статистики, дискретного подсчета частот, тестов нормальности, корреляционного анализа, однофакторного и двустороннего дисперсионного анализа с повторными измерениями, множества непараметрических тестов, таких как дисперсионный анализ Фридмана и двух выборочный анализ Колмогорова. –Тест Смирнова и критерий Манна–Уитни, инструменты анализа выживаемости, включая модель Weibull Fit и пропорциональную модель рисков Кокса, ROC–кривые, а также тесты мощности и размера выборки.

Расширенные функции обработки сигналов в OriginPro включают кратковременное БПФ (STFT), преобразование Гильберта, когерентность, 2D FFT и фильтрацию на основе 2D FFT, 2D корреляцию и вейвлет–анализ.

OriginPro предлагает больше способов обработки ваших данных изображения, включая альфа–смешивание, пиксельную логику, морфологическую фильтрацию и интерполированное вычитание фона.

Благодаря таким мощным аналитическим возможностям OriginPro является предпочтительным программным обеспечением для тех, кому нужно единое решение для анализа данных и построения графиков.

3.3 Анализ результатов

В ходе тестирования программы были получены результаты. Эти результаты с помощью программы Origin были визуализированы в графике, для дальнейшего анализа. Благодаря построенным графиком можно наглядно продемонстрировать прирост скорости, из–за счет чего он происходит.

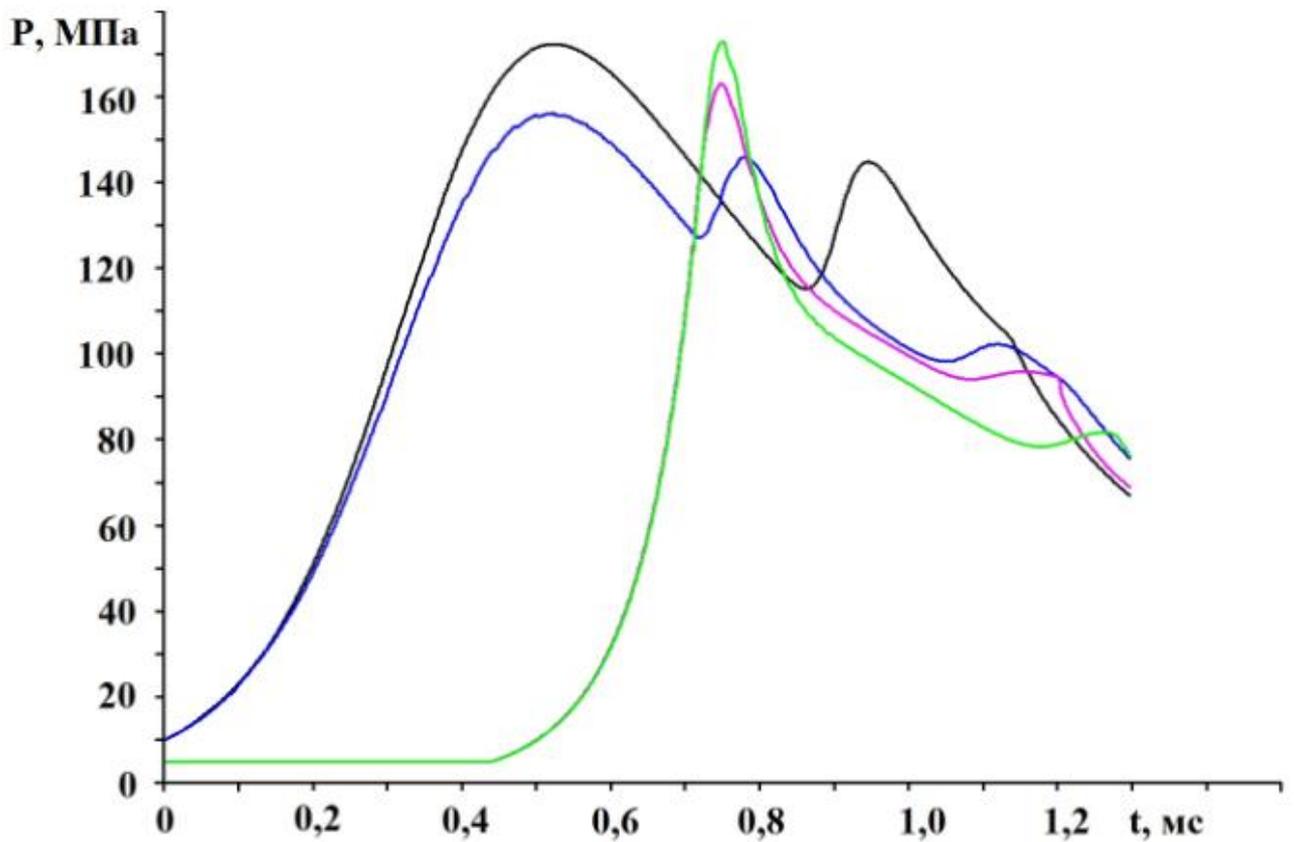


Рисунок 9– Расчетные графики давлений в системе “эстафетной” схемы выстрела

Черным цветом обозначается давление на дно канала, синим давление на поршень слева, розовым на поршень справа, зеленым давление на снаряд.

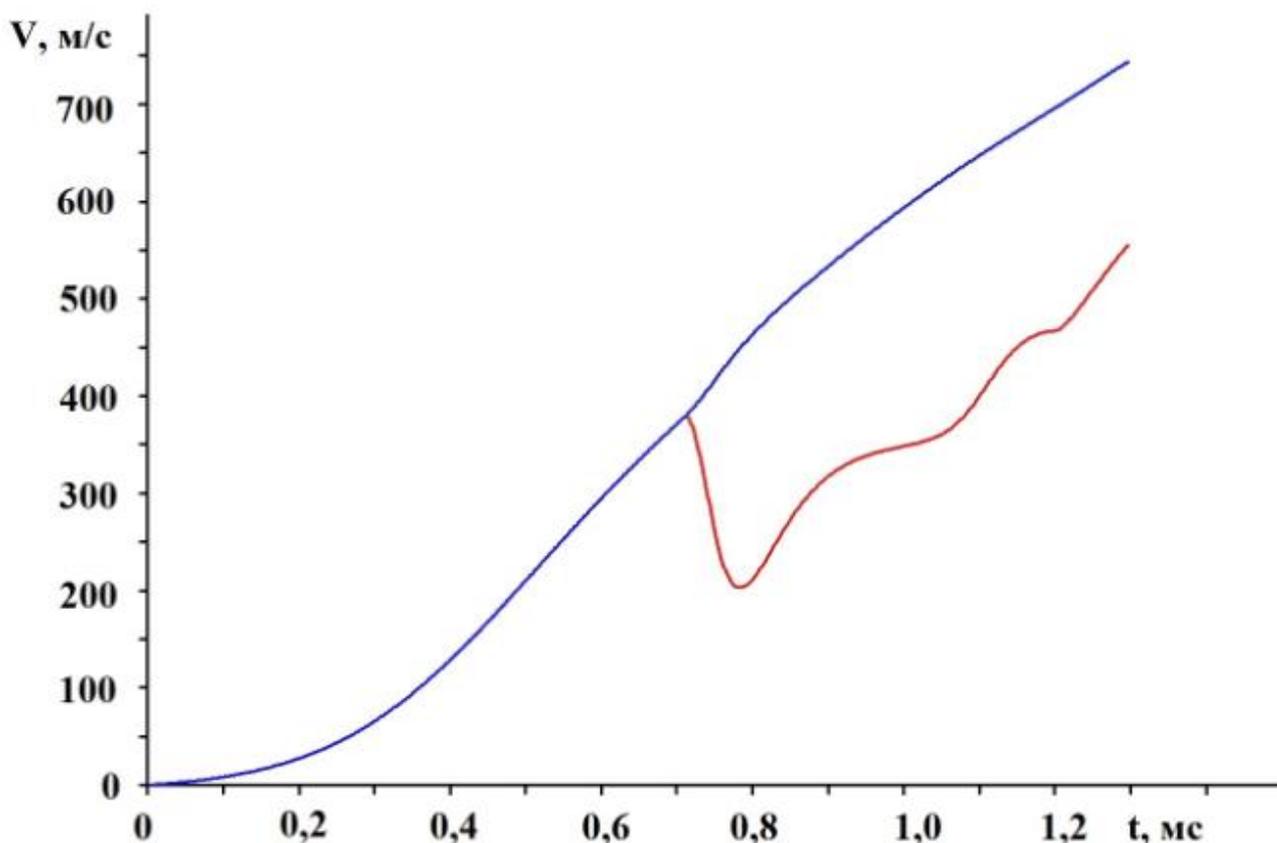


Рисунок 10–Скорости метаемого элемента

На графике выше мы видим скорость снаряда с использованием “эстафетной” схемы метания. Синим цветом обозначается скорость метаемого элемента, красным – скорость поршня.

Таким образом в данном разделе были представлены программы, в которых происходила работа, а также полученные графики. На графиках мы видим, что прирост скорости по сравнению с традиционными схемами метания. В те моменты, когда в классической схеме метания происходил бы спад скорости или равномерное движение, в эстафетной схеме метания, наоборот, происходит значительный рост скорости.

Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы на тему «Моделирование систем эстафетной схемы с использованием метода распада произвольного разрыва» была изучена теория “эстафетной” схемы метания, а также процессы и взаимосвязи, происходящие во время данной схемы.

Цель исследования, разработка математической модели схемы метания, позволяющей значительно повысить скорость снаряда за счет использования эстафетной схемы, была достигнута благодаря выполнению всех поставленных в данной работе задач.

В данном исследовании к выпускной работе, были выполнены следующие задачи. Были изучены используемые на данный момент схемы метания. Составлена математическая модель “эстафетной” схемы метания. Была рассмотрена задача о распаде произвольного разрыва. Удалась программная реализация математической модели.

Расчётами было установлено, что предложенная эстафетная схема позволит повысить начальную скорость метания примерно на 10% при одинаковых максимальных давлениях, по сравнению с классической схемой в системе.

Список используемой литературы

1. Березин И.С., Жидков И.Л. Методы вычислений. М.: Физматлит, 1960. Т. 2. 620 с.
2. Бетехин С.А., Веницкий А.М., Горохов М.С., Станюкович К.П. Газодинамические основы внутренней баллистики. Москва: Оборонгиз, 1957. 384 с.
3. Вентцель Д.А. Внутренняя баллистика. Москва: ВВА им. Н. Е. Жуковского, 1939. 414 с.
4. Вилунов В.Н. Теория зажигания конденсированных веществ. Новосибирск: Наука, 1984. 189 с.
5. Газодинамические основы внутренней баллистики/ С.А.Бетехин, А.М.Веницкий, М.С.Горохов, К.П.Станюкович и др. – М.:Оборонгиз, 1957.– 384с.
6. Дроздов Н. Ф. Решение задач внутренней баллистики для бездымного пороха // Арт. Журн. 1903. № 5. С. 497 – 503.
7. Ильичев А.Т. и Куликовский А.Г. Задача о распаде произвольного разрыва.
8. Комаровский Л.В., Панков В.Н. Об одной схеме ускорения тела в пусковой трубе и газодинамическом анализе ее с учетом образования и взаимодействия всех поверхностей разрыва,– В сб.:Аэрогазодинамика быстропротекающих процессов. Томск, изд.ТГУ, 1979, с.35–39.
9. Кочин Н. Е., Соч., т. II. М. –Л. : Изд-во АН СССР, 1949.
10. Крайко А.Н. О поверхностях разрыва в среде, лишенной "собственного" давления//ПММ, 1979. Т.43, В.3. С.500–519.
11. Крилл Л.М, редактор. Современная техника аэродинамических исследований при гиперзвуковых скоростях. Москва: Машиностроение, 1965. 539 с.

12. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред // М.: Наука, 1987. Ч.1. 464 с.
13. Нох В.Ф. СЭЛ – совместный эйлерово – лагранжев метод для расчета нестационарных двумерных задач // Вычислительные методы в гидродинамике. М., 1967, С. 128 – 189.
14. Рахматуллин Х.А. Основы газодинамики взаимопроникающих движений сжимаемых сред // ПММ. 1956. Т.20. В.1.С.184–195
15. Рождественский Б.Л., Яненко Н.Н. Системы квазилинейных уравнений и их приложения к газовой динамике. // М.: Наука, 1978. 688 с.
16. Русяк И.Г., Ушаков В.М. Внутрикамерные гетерогенные процессы в ствольных системах. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 259 с
17. Рябов А.С. Метод решения главной задачи внутренней баллистики. Москва:МСХМ, 1949. 105 с.
18. Сафронов А.И Внутрибаллистическое проектирование метательных систем. Сборник научных статей II Всероссийской научной конференции с международным участием. 2019.
19. Сафронов А.И. Внутренняя баллистика ствольной системы с присоединенной камерой подгона / А.И.Сафронов, А.Ю. Крайнов // Вестник ТГПУ.—2004. Вып.6(43). С. 67–70.
20. Сафронов А.И., Потапенко В.В. Анализ и баллистическое проектирование системы с присоединенной камерой подгона. Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. №3(19), 2009 г, с. 212–216.
21. Сафронов А.И., Ушаков В.М., Русяк И.Г. О газодинамическом методе расчета последовательного воспламенения полужарядов в артиллерийской системе,— В сб.: Теория, расчет, производство и эксплуатация боеприпасов: Тез. докл. XII Всесоюзн. конф. Пенза, ПВАИУ, 1978, с.40.
22. Серебряков М.Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. Москва: Оборонгиз, 1962.

23. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С.К. Годунов [и др.] // М.: Наука, 1976. 400с.
24. Яушев И.К. Распад произвольного разрыва в канале со скачком площади сечения // Известия СО АН СССР, 1967, В. 2, № 8 – серия технических наук. С.109–120.
25. Bicen A.F. Subconic single – phase flow in a gun simulator // AIAA J. 1988. V. 25, N 1. P. 47–51.
26. Cels A., Simonin R. Improvement in or relating to ballistic devices and projectiles, 1273208, 1972.
27. Corner J. Theory of the Interior Ballistics of Guns. London: New York, 1950. 462 pp.
28. Donald E. Carlucci, Sidney S. Jacobson. Ballistics – Theory and Design of Guns and Ammunition Carlucci. — 1st Edition, Kindle Edition, 2007
29. Scott Meyers. Effective Modern C++. O’Reilly, 2015. MPI: A Message Passing Interface Standard Version 2.2.