



## Аннотация

Темой выпускной квалификационной работы является исследование процесса воспламенения инициирующих составов в импульсной системе. Эта работа посвящена глубокому изучению процесса воспламенения, который происходит при выстреле, особенно фокусируясь на процессах, которые происходят в предварительном периоде выстрела, и анализу их последствий.

Целью данной работы является моделирование процесса выстрела на основе разработанной математической модели. Для достижения этой цели и получения результатов в работе используется совместный Эйлера-Лагранжев метод, который также известен как метод СЭЛ.

Работа структурирована следующим образом: она начинается с введения, за которым следуют три главы, каждая из которых посвящена определенной аспекту исследования. После трех глав идет заключение, в котором подводятся итоги всей работы и формулируются основные выводы. В конце работы приведен список используемой литературы. Общий объем моей работы составляет 43 страницы.

## **Abstract**

The topic of the final qualifying work is the study of the ignition process of initiating compositions in a pulsed system. This work is devoted to an in-depth study of the ignition process that occurs during a shot, especially focusing on the processes that occur in the preliminary period of the shot and the analysis of their consequences.

The purpose of this work is to simulate the firing process based on the developed mathematical model. To achieve this goal and obtain results, the work uses the joint Eulero-Lagrange method, which is also known as the SEL method.

Work is structured as follows: it begins with an introduction, followed by three chapters, each focusing on a specific aspect of the study. After three chapters there is a conclusion, which summarizes the results of all the work and formulates the main conclusions. At the end of the work there is a list of references used. The total volume of my work is 43 pages.

## Оглавление

Введение.....	5
Глава 1. Модель ОЗВБ на основе подхода механики гетерогенной среды.....	8
1.1 Допущения.....	8
1.2 Система уравнений двухфазной двухскоростной среды.....	9
1.3 Начальные и граничные условия.....	15
1.4 Твердофазная локальная модель зажигания.....	17
1.5 Уравнение и условие зажигания.....	18
Глава 2. Решение ОЗВБ с учётом постепенного воспламенения.....	27
Глава 3. Обсуждение результатов.....	36
Заключение.....	40
Список используемой литературы.....	42

## Введение

Исследование процессов воспламенения состава в импульсных системах является крайне важной областью в современной артиллерии. Её изучение позволит лучше понять физико-химические процессы, происходящие при выстреле, в следствие чего можно будет использовать полученные результаты для усовершенствования артиллерийских систем.

Выстрел является ключевым понятием в артиллерии. Состоит выстрел из 4 периодов (рисунок 1), которые будут рассмотрены ниже.

### 1) Предварительный период.

«Предварительный период идёт от момента начала воспламенения заряда до момента врезания снаряда в нарезы ствола. В некоторых источниках данный период делится на 2. Первый – предварительный или пиростатический период длится от начала воспламенения заряда до начала движения такового. Второй – период форсирования длится от начала движения до окончания врезания ведущих поясков снаряда в нарезы. Данный период характеризуется тем, что его длительность может составить до 30% всей длительности выстрела. При этом его предпочитают игнорировать при расчётах.» [1]

### 2) Первый, или основной, период.

Первый период называют также основным, либо пиродинамическим периодом. Идёт он от завершения предварительного периода и вплоть до окончания горения пороха. Во время данного периода давление пороховых газов сначала резко возрастает, а после достижения максимума постепенно уменьшается. В данный период газы совершают основную часть работы.

### 3) Второй период.

Второй период, который также называют термодинамическим, идёт от завершения предыдущего периода и вплоть до вылета снаряда из канала ствола. На протяжении этого периода давление продолжает постепенно уменьшаться, скорость в это время увеличивается. Выделяется данный период

поскольку с его началом прекращается приток новых газов, но имеющиеся газы продолжают расширяться, увеличивая скорость снаряда.

#### 4) Период последствия.

«Период последствия или третий период – это период от вылета снаряда из канала ствола и до завершения последствия вышедших из ствола пороховых газов. В конце данного периода снаряд достигает максимальной скорости, сам период заканчивается при падении давления в канале ствола до начального давления до выстрела, или около  $1 \text{ кг/см}^2$ .» [2]

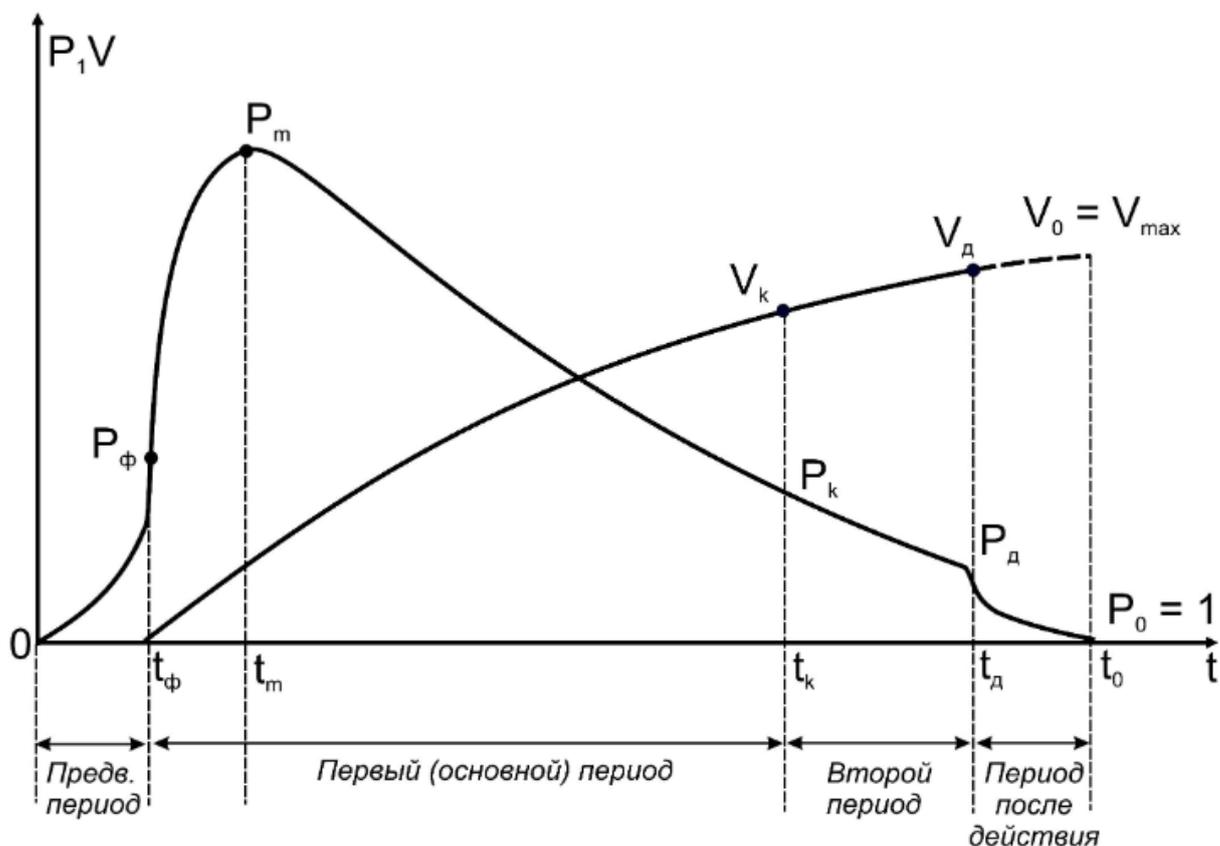


Рисунок 1 – Зависимость скорости снаряда и давления на стенки канала ствола от времени и периода выстрела

Актуальность ВКР: Практика моделирования баллистических систем не предполагает расчёт постепенного воспламенения заряда. Но длительность предварительного периода составляет до 30% от общего времени выстрела. Для проектирования основного заряда большой интерес представляет процесс

постепенного распространения пламени по заряду. Таким образом, необходимо моделирование постепенного воспламенения, а в дальнейшем и всего процесса выстрела с учётом начального периода.

Объект: Процессы, происходящие при классической схеме выстрела в предварительном периоде.

Предмет: Распространение фронта горения по заряду в предварительном периоде.

Цель ВКР: Моделирование процессов в баллистической системе в предварительном периоде.

Задачи ВКР:

1. Изучение баллистики системы классической схемы выстрела;
2. Постановка задачи постепенного воспламенения инициирующего состава;
3. Корректировка математической модели функционирования; баллистической системы с учётом постепенного воспламенения заряда;
4. Разработка программы на языке программирования высокого уровня;
5. Получение и анализ результатов моделирования предварительного периода системы.

# Глава 1. Модель ОЗВБ на основе подхода механики гетерогенной среды

## 1.1 Допущения

«Движение горящих пороховых элементов по каналу ствола в процессе выстрела представляет собой классический случай движения гетерогенной системы, обусловленного процессами тепло-массообмена и трения между фазами.

Теории движения многофазных гетерогенных сред посвящена обширная литература. В разные годы этим вопросом занимались многочисленные учёные. Наиболее распространенной и плодотворной концепцией, с точки зрения практических приложений, является представление различных фаз гетерогенного потока в виде отдельных взаимопроникающих сплошных сред. Данный подход 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.

Напомним основные допущения модели:

- расстояния, на которых параметры течения меняются существенно, много больше расстояний между частицами и размера самих частиц;
- различные фазы присутствуют одновременно во всех точках пространства, в то же время каждая фаза занимает часть объема смеси;
- расчет движения каждой фазы может производиться независимо от смеси при условии, что обеспечивается соответствующий учет взаимодействия между различными фазами;
- вязкость и теплопроводность существенна лишь в процессах взаимодействия фаз;
- частицы в среднем одинаковых размеров, столкновениям, т. е. взаимодействием между ними, можно пренебречь; » [3]

«В начале будем рассматривать двухфазный поток, состоящий из пороховых газов и совокупности горящих частиц зерненого пороха, характерный размер и концентрация которых такова, что выполняется допущение 1) (см. п. 4.1).

Дополнительно примем следующие допущения, связанные со спецификой задачи:

- движение фаз одномерно;
- теплоотдача к горячей поверхности зерен не учитывается (скорость движения тепловой волны в порохе равна скорости горения);
- материал частиц несжимаем;
- параметры газа внутри и вне пороховых элементов в данном сечении одинаковы.» [4]

## **1.2 Система уравнений двухфазной двухскоростной среды**

«Полагаем справедливым основное допущение механики сплошной среды: расстояния, на которых параметры течения смеси меняются существенно (вне поверхности разрыва), много больше характерных размеров пороховых элементов, а также расстояний между ними. Присвоим индекс  $i = 1$  параметрам первой фазы (пороховые газы), индекс  $i = 2$  -- параметрам второй фазы (пороховые элементы). Взаимопроникающее движение двух фаз будем рассматривать как движение их в пористой среде. Для любой из фаз другая будет пористой средой. Единица объема содержит пустоты (поры) объемом  $\tau$ . Это число назовем объемной пористостью (объемным содержанием или поровностью) данной пористой среды. Через  $m_2$  обозначим площад пор, приходящуюся на единицу поверхности, и назовем это число поверхностной пористостью. Пусть в пористой среде движется фаза  $i$  с плотностью  $\rho$ , и средней плотностью  $\bar{\rho}$  ( $\bar{\rho}$  - кажущаяся плотность, получаемая при равномерном распределении массы фазы по всему объему при отсутствии пористой среды).» [5]

Из определения пористости следует

$$\rho_i m_i = \bar{\rho}_i. \quad (1)$$

Если поле скоростей определяется вектором  $\vec{u}_i (\vec{u}_1 = \vec{v}, \vec{u}_2 = \vec{w})$ , то расход через единицу поверхности равен

$$\rho_i m_i^s \vec{u}_i \vec{n} = \bar{\rho}_i \vec{u}_i \vec{n}, \quad (2)$$

откуда следует равенство объёмной и поверхностной пористости.

В дальнейшем будем учитывать, что  $m_1 + m_2 = 1$ , при этом примем  $m_1 = m$ ,  $m_2 = 1 - m$ ,  $\rho_1 = \rho$ ,  $\rho_2 = \delta$ .

Рассматривая фиксированный в некоторой инерциальной системе координат объём  $\Omega$ , ограниченный поверхностью  $\Sigma$ , можно записать балансовые законы сохранения.

Закон сохранения массы:

$$\int_{\Omega} \frac{\partial}{\partial t} \rho m d\omega = - \int_{\Sigma} \rho m \vec{v} \vec{n} d\sigma + \int_{\Omega} G d\omega, \quad (3)$$

$$\int_{\Omega} \frac{\partial}{\partial t} \delta (1 - m) d\omega = - \int_{\Sigma} \delta (1 - m) \vec{w} \vec{n} d\sigma - \int_{\Omega} G d\omega. \quad (4)$$

«Уравнения (3.1) выражают закон сохранения вещества внутри рассматриваемого объема  $\Omega$ . Здесь  $\rho$ ,  $\delta$  - истинные плотности пороховых газов (первой фазы) и пороховых элементов (второй фазы) соответственно;  $v_i$ ,  $w_i$  -- проекция скоростей пороховых газов и пороховых элементов на внешнюю нормаль к элементу выделенной поверхности;  $G$  -- газоприход с поверхности пороха в единице объёма за единицу времени.» [6]

Закон сохранения счётной концентрации частиц:

$$\int_{\Omega} \frac{\partial}{\partial t} a d\omega = - \int_{\Sigma} a \vec{w} \vec{n} d\sigma. \quad (5)$$

«Уравнения сохранения импульсов должны отражать тот факт, что изменение количества движения каждой из фаз происходит за счет не только импульса сил давления, действующего на ограничивающую их поверхность 2, и притока импульса извне, но также и силового взаимодействия и массообмена между фазами внутри контрольного объема  $S_2$ . Заметим, что величина скорости оттока газов от горячей поверхности ( $v$ ) слабо зависит от давления [11] и составляет порядка 1 м/с, поэтому можно считать, что они поступают в объем, занятый газом, со скоростью  $w$ . Кроме сил давления и трения, на горящую частицу действует равнодействующая реактивных сил. Как показывают оценки, эта составляющая пренебрежимо мала.» [7]

С учетом сказанного уравнения, выражающие закон сохранения количества движения, запишутся в виде

$$\int_{\Omega} \frac{\partial}{\partial t} (\rho m \vec{v}) d\omega = - \int_{\Sigma} \rho m \vec{v} v_n d\sigma - \int_{\Sigma} \rho m \vec{n} d\sigma - \int_{\Omega} \vec{F}_{B3} d\omega + \int_{\Omega} G \vec{w} d\omega, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \frac{\partial}{\partial t} [\delta(1-m)\vec{w}] d\omega = & - \int_{\Sigma} \delta(1-m)\vec{w} w_n d\sigma - \\ & \int_{\Sigma} p(1-m)\vec{n} d\sigma + \int_{\Omega} \vec{F}_{B3} d\omega - \int_{\tau} G \vec{w} d\tau, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $F_{B3}$  – сила межфазового взаимодействия, приходящаяся на единичный объём гетерогенной среды.

В соответствии с [64-67], силу межфазового взаимодействия необходимо представить в виде суммы двух составляющих:

$$\vec{F}_{B3} = \vec{\tau}_w + p\nabla(1-m), \quad (8)$$

где первая составляющая обусловлена разностью скоростей между фазами,  
 вторая – давлением газа в связи с расширением или сужением трубки тока второй фазы.

«Непосредственное получение уравнений энергии для каждой из фаз представляет значительные трудности, связанные с конкретизацией работы сил межфазового взаимодействия. Намного проще записать интегральное уравнение энергии смеси. Полная энергия смеси в объеме  $S_2$  изменяется за счет притока энергии извне, работы сил давления на ограничивающей поверхности  $\Sigma$  и притока химической энергии за счет горения пороха.» [8]

Таким образом, уравнение, выражающее баланс полной энергии смеси, запишется следующим образом:

$$\int_{\Omega} \frac{\partial}{\partial t} E d\omega = - \int_{\Sigma} \left[ \rho m \left( \varepsilon_1 + v^2/2 \right) v_n + \delta(1-m) \left( \varepsilon_2 + w^2/2 \right) w_n \right] d\sigma - \int_{\Sigma} p [m v_n + (1-m) w_n] d\sigma + \int_{\Omega} G Q' d\omega, \quad (9)$$

$$E = \rho m \left( \varepsilon_1 + v^2/2 \right) + \delta(1-m) \left( \varepsilon_2 + w^2/2 \right), \quad (10)$$

$$\varepsilon_1 = c_v T, \varepsilon_2 = c_k \overline{T_2}. \quad (11)$$

Здесь  $E_i$  – внутренняя энергия соответствующей фазы,  $T_2$  – средняя температура пороховых элементов (к-фазы);  $Q$  – теплота, выделяющаяся в результате химической реакции (горения).

Используя теоремы о дивергенции и градиенте, в области непрерывности параметров получаем дифференциальные уравнения сохранения массы, импульса каждой фазы и дифференциальное уравнение полной энергии смеси:

$$\frac{\partial \rho m}{\partial t} + \nabla \cdot \rho m \vec{v} = G, \quad (12)$$

$$\frac{\partial \delta(1-m)}{\partial t} + \nabla \cdot \delta(1-m) \vec{w} = -G, \quad (13)$$

$$\frac{\partial a}{\partial t} + \nabla \cdot a \vec{w}, \quad (14)$$

$$\frac{\partial \rho m \vec{v}}{\partial t} + \nabla^k \rho m \vec{v} v^k = -m \nabla p + G \vec{w} - \vec{\tau}_w, \quad (15)$$

$$\frac{\partial \delta(1-m) \vec{w}}{\partial t} + \nabla^k \delta(1-m) \vec{w} w^k = -(1-m) \nabla p + G \vec{w} - \vec{\tau}_w, \quad (16)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \left[ \rho m \left( \varepsilon_1 + v^2/2 \right) + \delta(1-m) \left( c_k \vec{T}_2 + w^2/2 \right) \right]}{\partial t} + \\ & \nabla \cdot \left[ \rho m \left( \varepsilon_1 + v^2/2 \right) \vec{v} + \delta(1-m) \left( c_k T_2 + w^2/2 \right) \vec{w} \right] + \\ & \nabla \cdot [\rho m \vec{v} + p(1-m) \vec{w}] = G Q'. \end{aligned} \quad (17)$$

Вводя оператор субстанциональной производной для каждой фазы

$$\frac{d_i}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{u}_i \cdot \nabla = \frac{\partial}{\partial t} + u_i^k \frac{\partial}{\partial x^k} \quad (k = 1, 2, 3), \quad (18)$$

где по верхним индексам, относящимся к координатным осям, идёт суммирование, можно представить систему уравнений (3.6) в иной форме:

$$\frac{d_1 \rho m}{dt} = -\rho m \nabla \cdot \vec{v} + G, \quad (19)$$

$$\frac{d_2 \delta(1-m)}{dt} = -\delta(1-m) \nabla \cdot \vec{w} - G, \quad (20)$$

$$\frac{d_2 a}{dt} = -a \nabla \cdot \vec{w}, \quad (21)$$

$$\rho m \frac{d_1 \vec{v}}{dt} = -m \nabla p + G(\vec{w} - \vec{v}) - \vec{\tau}_w, \quad (22)$$

$$\delta(1-m) \frac{d_2 \vec{w}}{dt} = -(1-m) \nabla p + \vec{\tau}_w, \quad (23)$$

$$\begin{aligned}
& pm \frac{d_1 \left( \varepsilon_1 + v^2/2 \right)}{dt} + \delta(1-m) \frac{d_2 \left( \varepsilon_2 + w^2/2 \right)}{dt} \\
& = -\nabla \cdot [pmv + p(1-m)w] + G \left( Q' + \varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \frac{v^2 - w^2}{2} \right). \quad (24)
\end{aligned}$$

В дальнейшем предположим, что поток тепла от второй фазы равен потоку тепла от продуктов горения ко второй фазе. Таким образом, мы постулируем "автотермичность" процесса горения  $T_2 = \text{const}$  --- тепло, необходимое для нагрева второй фазы до температуры горения, возвращается с продуктами сгорания. Если пренебречь к тому же прогревом k-фазы в период воспламенения, то можно положить  $T_2 = T_n$ . С учетом также условия несжимаемости второй фазы ( $\delta = \text{const}$ ) из первых двух уравнений системы (3.7) следует соотношение

$$\frac{m}{\rho} \frac{d_1 \rho}{dt} = G \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\delta} \right) - \nabla \cdot [m\vec{v} + (1-m)\vec{w}]. \quad (25)$$

Поэтому уравнение энергии внутренней смеси можно записать в более явном виде:

$$\begin{aligned}
m\rho \frac{d_1 \varepsilon_1}{dt} & = \vec{\tau}_w (\vec{v} - \vec{w}) - p\nabla \cdot [m\vec{v} + (1-m)\vec{w}] + \\
& G \left[ Q' + \varepsilon_2 - \varepsilon_1 + \frac{(\vec{v} - \vec{w})^2}{2} \right]. \quad (26)
\end{aligned}$$

Теплота, выделяющаяся в результате химической реакции (горения), связана с теплотворной способностью (калорийностью) пороха  $Q$  зависимостью  $Q' = Q - ckT_n$ .

Присоединяя к системе (3.6) или (3.7) уравнение состояния и уравнение горения пороховых элементов заряда

$$p \left( \frac{1}{\rho} - \alpha \right) = RT, \quad (27)$$

$$\frac{d_2 \psi}{dt} = \frac{\partial \psi}{\partial t} + w \nabla \psi = \frac{S_0}{\Lambda_0} \sigma(\psi) u_k, \quad (28)$$

приходим к системе пространственных газодинамических уравнений, описывающей баллистику выстрела ствольных систем с учетом отставания порохового заряда. Квазиодномерная аппроксимация системы уравнений (3.6), полученная при осреднении потока по площади поперечного сечения, будет приведена позднее.

Следует подчеркнуть, что в силу исходных допущений применимость полученной системы уравнений ограничена областью объемных содержаний  $m < m < 1$ , где  $m$  соответствует насыпной (гравиметрической) плотности заряда. Расширение области применимости связано с введением напряжения во второй фазе (в приведенной модели среда второй фазы имеет нулевое давление

### 1.3 Начальные и граничные условия

Сформулируем начальные и граничные условия:

- При  $t=0$ ,  $0 \leq x \leq L_{км}$ ;

$$v = 0, p = p_H, \tilde{\rho} = \Delta, \psi = \psi_H = \frac{\delta/\Delta - 1}{f \delta/p_H + \alpha \delta - 1}, \quad (29)$$

- При  $x = 0$ ,  $t \geq 0$

$$v = 0. \quad (30)$$

- При  $x = x_{сн}$ ,  $t \geq 0$

$$q \frac{dv_{сн}}{dt} = S p_{сн}, v = v_{сн}. \quad (31)$$

«Итак, имеем систему уравнений (2.1) относительно неизвестных  $v$ ,  $p$ ,  $\rho$ ,  $e$ ,  $W$ , которая вместе с начальными и граничными условиями (2.2) (2.4) позволяет решать основную задачу внутренней баллистики на основе газодинамического подхода в рамках гипотезы газопороховой смеси.

В условиях артиллерийского выстрела при скоростях снаряда  $v < 2000$  м/с влияние противодействия воздушного столба незначительно. Для систем со скоростями  $v > 2000$  м/с учет сопротивления воздушного столба необходим, так как впереди снаряда образуется ударная волна, давление в которой в 100 раз превышает атмосферное, что вносит поправку к значению  $v$ , на 5–7 %. При этом возникающая впереди снаряда волна сжатия сильно влияет на среду за срезом ствола в период последствий. Информация о состоянии воздуха впереди снаряда также необходима при исследовании работы механических устройств, устанавливаемых в дульной части ствола (дульного тормоза, дульного ускорителя, газоотводного устройства).» [9]

Решение ОЗВБ в заснарядном пространстве осуществляется одновременно с решением задачи о сжатии воздуха быстродвижущимся снарядом в стволе орудия с постановкой граничных условий на дульном срезе. Уравнение движения снаряда (2.4) в данном случае имеет вид

$$q \frac{dv_{\text{сн}}}{dt} = S(p_{\text{сн}} - p_{\text{пр}}), \quad (32)$$

где  $P_{\text{пр}}$  – давление сжатого воздуха перед снарядом.

С учётом противодействия и продольной силы реакции сопротивления уравнение движения снаряда (2.4) примет вид

$$q \frac{dv_{\text{сн}}}{dt} = S(p_{\text{сн}} - p_{\text{пр}}) - F, \quad (33)$$

где  $F$  – сила трения снаряда о ствол.

Движение начинается при условии  $S(P_{сн} - P_{пр}) - F = 0$ , т. е. с ускорением, равным нулю, тогда как при обычном подходе ускорение снаряда в момент начала движения изменяется скачком от нуля до  $SP_{\phi}/q$ .

Противодавление  $P_{пр}$  с достаточной точностью определяется из решения задачи о движении поршня в трубе с постоянной скоростью как давление за отошедшей ударной волной:

$$p_{пр} = p_H \left( 1 + \frac{k(k+1)}{4} \frac{v_{сн}^2}{c_B^2} + \frac{kv_{сн}}{c_B} \sqrt{1 + \frac{(k+1)^2 v_{сн}^2}{16c_B^2}} \right), \quad (34)$$

где  $p_H$  – начальное давление воздуха в стволе;

$$c_B = \sqrt{k_B p_H / \rho_B} \text{ – скорость звука в воздухе;}$$

$k_B, \rho_B$  – показатель адиабаты и плотность воздуха впереди ударной волны соответственно.

«Учет влияния силы трения на характеристики выстрела представляет собой сложную проблему, в которой должны рассматриваться такие процессы, как разогрев, плавление поверхности контакта, частичный унос материала. Этому вопросу посвящено много работ. Известны зависимости, аппроксимирующие экспериментальные результаты, учитывающие влияние давления и скорости скольжения на силу трения. Однако они получены для конкретных контактных пар и в определенном диапазоне скоростей, а поэтому не универсальны.

Математические модели взаимодействия снаряда с нарезами ствола и контактное трение рассмотрены в работах. В ряде случаев трением между снарядом и стволом можно пренебречь.» [10]

## **1.4 Твердофазная локальная модель зажигания**

«Ниже рассматривается простейшая одномерная тепловая модель зажигания конденсированного вещества. В ней предполагается, что ответственными за зажигание являются суммарно-экзотермические процессы разложения, протекающие в конденсированной фазе вещества. Возможные фазовые переходы (испарение, плавление, абляция) не учитываются.

Твердофазная модель сравнительно легко поддается аккуратной математической обработке и дает ключ к пониманию физики процесса зажигания более сложных моделей.

Для зажигания к-вещества необходим внешний тепловой импульс. При воздействии этого импульса происходит прогрев поверхностных слоев к-вещества и ускорение экзотермических реакций. Далекая от поверхности холодная часть к-вещества служит своеобразным стоком тепла. Очевидно, зажигание произойдет только тогда, когда интенсивность стока тепла сравняется или станет меньше интенсивности источника в зоне химической реакции [1-3]. В некоторых случаях (зажигание горячим телом при продолжительном действии источника тепла) возможен сток тепла не только в холодную часть к-вещества, но и в поджигающую среду.» [11]

## **1.5 Уравнение и условие зажигания**

Для описания процесса зажигания заряда в контейнере используется твердофазная локальная модель теплового воспламенения.

Предполагается, что за промежуток времени, в течение которого происходит зажигание в данной точке поверхности, выгорание мало, химические реакции возбуждаются в узком слое у поверхности взаимодействия твёрдой и газовой фаз.

$$\frac{E}{RT_2} \gg 1, \quad \frac{c\rho_2}{Q_p} \cdot \frac{RT_2}{E} \ll 1. \quad (35)$$

При этом уравнение зажигания имеет вид:

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} + \frac{Q_z}{C_2} \exp\left(-\frac{E}{RT_2}\right) \quad (36)$$

Начальные условия

$$T_2(x, y, 0) = T_H,$$

где  $T_H$  - начальная температура заряда.

Граничные условия

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2(x, 0, t)}{\partial y} = q_{ГП}, \quad (38)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2(x, \infty, t)}{\partial y} = 0. \quad (39)$$

Тепловой поток  $q_{ГП}$  определяется по закону теплоотдачи Ньютона

$$q_{ГП} = \alpha_T(T_\Gamma - T_\Pi).$$

Время зажигания  $t_3(x)$  данной точки поверхности находится внутри интервала, определяемого условиями [83].

$$\frac{\partial^2 T_\Pi}{\partial t^2} > 0. \quad (40)$$

Критерий воспламенения можно взять в виде [146] равенства скоростей теплоотвода и тепловыделения.

$$\alpha_T^2 (T_\Gamma - T_\Pi)^2 \leq \lambda_2 Q_z \rho_2 \frac{R_0 T_\Pi}{E_0} \cdot \exp\left(-\frac{E_0}{R_0 T_\Pi}\right). \quad (41)$$

Предварительные расчёты показали, что времена воспламенения, определяемые по (23) – (24) отличаются между собой незначительно. Это объясняется очень сильной зависимостью скорости внутреннего тепловыделения от температуры. Поэтому каждое из приведённых выше условий может быть принято за условие зажигания. В практических расчётах можно использовать неравенство

$$T_{\Pi} > T_*, \quad (42)$$

где  $T_*$  – следует выбирать заведомо больше температуры воспламенения.

Введём безразмерные переменные, согласно принятым в теории зажигания.

$$\vartheta = \frac{E}{RT_*^2} (T_2 - T_*), \eta = \frac{y}{y_*}, \tau = \frac{t}{t_*}. \quad (43)$$

$T_* = 600$  К – масштаб температуры заведомо больше температуры воспламенения поверхности пороха;

$t_* = \frac{L_K}{C_0}$  – характерное время всей задачи;

$y_* = \sqrt{\kappa_2 t_*}$  – длина пути, который проходит тепловая волна за характерное время  $t_*$ . Уравнение зажигания в относительных переменных примет вид:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} + K_e \exp\left(\frac{\theta}{1 + \gamma \theta}\right), \quad (44)$$

$t_a$  – адиабатический период индукции;

Граничные условия:

$$-\frac{\partial \theta(x, 0, \tau)}{\partial \eta} = K_7 q_{\Gamma\Pi}, \quad (45)$$

где  $K_7 = \frac{E y_*}{\lambda_2 R T_*^2}$ .

Численно уравнение зажигания решается методом прогонки. Уравнение зажигания в разностном виде:

$$\frac{\theta_j^{n+1} - \theta_j^n}{\Delta \tau} = \frac{\theta_{j-1}^{n+1} - 2\theta_j^{n+1} - \theta_{j+1}^{n+1}}{\Delta \eta^2} + K_e \exp\left(\frac{\theta_j^n}{1 + \gamma \theta_j^n}\right). \quad (46)$$

Решение ищется в виде

$$\theta_j^{n+1/2} = Z_j \theta_{j+1}^{n+1/2} + F_j, j = 0, \dots, m-1, \quad (47)$$

где  $Z_j, F_j$  - прогоночные коэффициенты.

Осуществив некоторые преобразования с учетом граничных условий, имеющих вид:

$$-\frac{\theta_1 - \theta_{-1}}{2\eta} = A - B\theta_0, -\frac{\theta_{m+1} - \theta_{m-1}}{2\eta} = 0, \quad (48)$$

получим

$$z_0 = \frac{2R}{1 + 2R + 2R\eta B}, \quad (49)$$

$$F_0 = \frac{z_0}{2R} \left[ 2R\eta A + \theta_0^{n+1/2} - \Delta \tau K_e \exp\left(\frac{\theta_0^{n+1/2}}{1 + \gamma \theta_0^{n+1/2}}\right) \right], \quad (50)$$

$$z_j = \frac{R}{1 + 2R - RZ_{j-1}}, \quad (51)$$

$$F_j = \frac{z_j}{R} \left[ RF_{j-1} + \theta_j^{n-\frac{1}{2}} + \Delta\tau K_e \exp\left(\frac{\theta_j^{n-\frac{1}{2}}}{1 + \gamma\theta_j^{n-\frac{1}{2}}}\right) \right], \quad (52)$$

$$\theta_m^{n+\frac{1}{2}} = 2RF_{m-1} + \theta_m^{n-\frac{1}{2}} + \Delta\tau K_e \exp\left(\frac{\theta_m^{n-\frac{1}{2}}}{1 + \gamma\theta_m^{n-\frac{1}{2}}}\right), \quad (53)$$

где

$$R = \frac{\Delta\tau}{\eta^2}. \quad (54)$$

При расчётах были выбраны  $\eta=0,3$ ;  $m=10$ .

Постановка задачи. «Рассматривается неограниченная пластина к-вещества (длина и ширина пластины велики по сравнению с толщиной). Изменение температуры происходит только в направлении  $x$  (рисунок 2), производные от температуры по  $y$  и  $z$  равны нулю. В результате этого допущения приходим к одномерной модели зажигания.» [12]

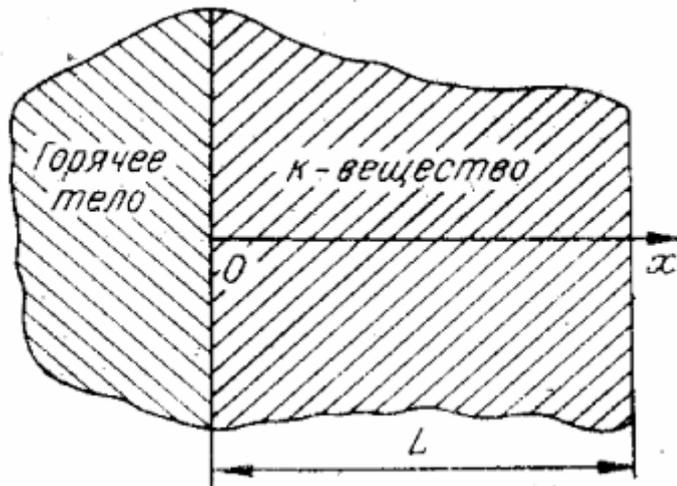


Рисунок 2 – К иллюстрации зажигания к-вещества горячим телом

«До момента времени  $t < 0$  пластина к-вещества равномерно прогрета до температуры  $T_H \gg 0$ ; при  $t = 0$  она одной своей поверхностью, например левой

( $x = 0$ , рис. 1.1), приводится в соприкосновение с нагретым до постоянной температуры  $T_s > T_n$  горячим телом (средой). Предполагается, что между поверхностями тела и пластины происходит идеальный теплообмен ( $\alpha d/\lambda \rightarrow \infty$ ), где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи в законе Ньютона;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности в законе Фурье;  $d$  – характерный размер), так что температура левой поверхности пластины до некоторого фиксированного момента времени  $t_0$  равна температуре термостата  $T_s$ . Рассмотрим импульсную постановку задачи, а именно: допустим, что по истечении времени  $t_1$  горячая поверхность пластины снимается с термостата и приводится в соприкосновение с адиабатической поверхностью, которая не воспринимает и не отдает тепла. Правая (холодная) поверхность пластины все время находится в контакте с адиабатической поверхностью.» [13]

«Задача исследования заключается в нахождении температурных полей в различные моменты времени, а также времени зажигания, когда наступает самопроизвольное разогревание левой поверхности к-вещества. Одновременно нас будет интересовать величина теплового импульса, потребного для зажигания, и количество тепла, выделяющегося в конденсированной фазе при протекании экзотермических реакций.» [14]

Уравнение распространения тепла для твердофазной модели зажигания имеет следующий вид [1]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{Q_z}{c} \exp(-E/RT_s). \quad (55)$$

«Оно не учитывает эффекта выгорания, что справедливо для двух частных случаев: когда реакции конденсированной фазы протекают, следуя нулевому порядку по концентрации, либо когда время зажигания настолько мало, что за этот промежуток выгорает незначительная часть к-вещества.» [15]

«В уравнении (1.1) приняты следующие обозначения:  $T$  - абсолютная температура, К;  $\kappa$  - температуропроводность, см<sup>2</sup>/с;  $Q$  - тепловой эффект

реакции конденсированной фазы, отнесенный к единице массы, кал/г;  $z$  - предэкспонент,  $1/c$ ;  $c$  - удельная теплоемкость, кал/г.К;  $E$  - энергия активации, кал/моль;  $t$  - время, с;  $x$  - декартова координата, см.» [16]

Уравнение (31) надлежит решать при следующих начальных и краевых условиях:

1.  $T(x, 0) = T_n; 0 \leq x \leq L$ , где  $L$  - ширина пластины  $k$  - вещества;
2.  $T(0, t) = T_s$ , при  $0 < t \leq t_1$ ;  

$$\frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = 0, \text{ при } t > t_1;$$
3.  $\frac{\partial T(L, t)}{\partial x} = 0, \text{ при } t > 0;$

Вместо второго краевого ( $x = L$ ) условия можно было бы задать условие  $T(L, t) = T_n$  для всех  $t > 0$ , что равно-сильно дополнительному стоку тепла на холодной стороне пластины.

Прежде чем поставить условия, определяющие критический момент зажигания, исследуем качественное развитие процесса нагревания пластины, исходя лишь простых физических представлений.

«Пусть  $t_1$  -- время действия теплового импульса. К моменту времени  $t_1$  в  $k$ -вещество от нагревателя подводится количество тепла  $Q_s$ . В результате действия этого импульса тепла пластина прогревается; в ней, в силу наличия нелинейного члена в уравнении теплопроводности, ускоряется экзотермическая реакция. Если внешний тепловой импульс мал, то после прекращения его действия тепло, подведенное к поверхности от термостата и выделившееся в результате реакции, рассредоточится в толще  $k$ -вещества. Через некоторый промежуток времени  $t \gg t_1$  температура упадет до  $T_1 \cong T_n$ , мало отличающейся от начальной; зажигания не произойдет.» [17]

Однако, если к моменту времени  $t = t_1$  скорость реакции успеет существенно возрасти, это приведет к увеличению скорости тепловыделения

в узком слое к-вещества, прилегающего к горячему термостату, - происходит зажигание. Таким образом, критическое время действия импульса, которое приводит к зажиганию, определяется условиями

$$\frac{\partial T}{\partial x} |_{x=0} = 0; \frac{\partial T}{\partial t} |_{x=0} > 0 \text{ для всех } t > t_*, \quad (56)$$

где  $t_*$  является наименьшим из всех возможных, когда соблюдены условия (1.2).

Уравнение (1.1) относится к классу параболических квазилинейных уравнений в частных производных. Точного аналитического решения поставленной задачи получить не удастся. Поэтому ниже используются разностные методы решения и приближенные аналитические методы.

Полная постановка задачи:

$$\frac{\partial \rho m S}{\partial t} + \frac{\partial \rho m S v}{\partial x} = S G, \quad (57)$$

$$\frac{\partial \delta(1-m)S}{\partial t} + \frac{\partial \delta(1-m)S w}{\partial x} = -S G,, \quad (58)$$

$$\frac{\partial \rho m S v}{\partial t} + \frac{\partial \rho m S v^2}{\partial x} = -m S \frac{\partial p}{\partial x} + S G w - S \tau_w - \Pi_c \tau_{1c}, \quad (59)$$

$$\frac{\partial \delta(1-m)S w}{\partial t} + \frac{\partial \delta(1-m)S w^2}{\partial x} = -(1-m)S \frac{\partial p}{\partial x} - S G w + S \tau_w - \Pi_c \tau_{2c}, \quad (60)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho m S \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho m S \varepsilon v}{\partial x} &= p \frac{\partial [m S v + (1-m)S w]}{\partial x} \\ + S G \left[ Q + \frac{(v-w)^2}{2} \right] &+ S \tau_w (v-w) + \Pi_c \tau_c v - \Pi_c q_c, \end{aligned} \quad (61)$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} + w \frac{\partial \Psi}{\partial x} = \frac{S_0}{\Lambda_0} \sigma(\Psi) u_k, \quad (62)$$

$$p(1-\alpha\rho) = (k-1)\rho\varepsilon., \quad (63)$$

В результате всех вышеперечисленных условий полная постановка задачи представлена в виде вышеуказанной системы уравнений, которую и требуется решить в ходе работы.

Выводы по первой главе.

В данной главе были рассмотрены различные теоретические фрагменты, необходимые для реализации программы и продвижения в плане выполнения работы.

Были рассмотрены допущения, которых стоит придерживаться, начальные и граничные условия, за которые нельзя выходить, была выведена система уравнений двухфазной двухскоростной среды, от которой предстоит отталкиваться.

Также было рассмотрено, что из себя представляет твердофазная локальная модель зажигания, после чего рассмотрены уравнение и условие зажигания.

После рассмотрения всего перечисленного была представлена начальная постановка задачи, от которой постепенно был осуществлён переход к полной постановке задачи, представляющей из себя систему из 8 уравнений, которую необходимо решить в ходе данной работы.

## Глава 2. Решение ОЗВБ с учётом постепенного воспламенения

Рассмотрим несколько известных языков программирования, их достоинства и недостатки, чтобы выявить, какой язык лучше использовать для нашей задачи.

### 1. Python

Преимущества:

- простой и читаемый синтаксис;
- огромное количество библиотек и фреймворков;
- идеально подходит для быстрой разработки и прототипирования;
- хорош для научных вычислений и анализа данных (NumPy, pandas);

Недостатки:

- сравнительно низкая производительность по сравнению с компилируемыми языками;
- один из худших для мобильной разработки;
- высокая нагрузка на память.

### 2. Java

Преимущества:

- переносимость приложений благодаря JVM (Java Virtual Machine);
- хорошая производительность;
- часто используется в корпоративных приложениях;
- большая стандартная библиотека;

Недостатки:

- сложный и многословный синтаксис;
- медленный старт приложений из-за JVM;
- не такой гибкий, как некоторые другие языки.

### 3. JavaScript

Преимущества:

- широкое применение в веб-разработке;

- возможность работы как на стороне клиента, так и на стороне сервера (Node.js);
- множество фреймворков и библиотек (React, Angular, Vue);

Недостатки:

- некоторая непредсказуемость из-за динамической типизации;
- проблемы с безопасностью;
- производительность ниже, чем у некоторых других языков.

#### 4. C#

Преимущества:

- интеграция с .NET и отличная поддержка от Microsoft;
- отлично подходит для разработки настольных приложений и игр (Unity);
- поддержка межплатформенной разработки благодаря .NET Core;

Недостатки:

- зависимость от экосистемы Microsoft;
- меньше кроссплатформенных возможностей по сравнению с Java;
- сравнительно высокий порог вхождения.;

#### 5. C++

Преимущества:

- высокая производительность и эффективность;
- широкие возможности для низкоуровневого программирования;
- применяется в критически важных приложениях (игры, системы реального времени, драйверы).

Недостатки:

- сложный и многословный синтаксис;
- высокий риск ошибок, связанных с управлением памятью;
- требует значительных усилий на отладку и тестирование.

#### 6. Ruby

Преимущества:

- простой и лаконичный синтаксис;

- хорошо подходит для веб-разработки (Ruby on Rails);
- высокая продуктивность разработчиков;

Недостатки:

- низкая производительность по сравнению с компилируемыми языками;
- меньшее сообщество и количество библиотек по сравнению с Python;
- менее эффективен для больших проектов.

## 7. PHP

Преимущества:

- широкое использование в веб-разработке;
- большое количество фреймворков и библиотек (Laravel, Symfony);
- прост в освоении для начинающих;

Недостатки:

- низкая производительность и масштабируемость;
- исторически плохая репутация из-за ошибок безопасности;
- меньше возможностей для современных приложений по сравнению с другими языками.

## 8. Swift

Преимущества:

- высокая производительность;
- современный и безопасный синтаксис;
- хорош для разработки приложений под iOS и macOS;

Недостатки:

- ограниченная платформонезависимость;
- молодой язык, меньше библиотек и фреймворков;
- сложности с интеграцией с более старыми проектами на Objective-C.

## 9. Kotlin

Преимущества:

- полная совместимость с Java;
- поддержка от Google для Android-разработки;

- высокая безопасность благодаря null-безопасности.

Недостатки:

- относительно молодой язык;
- ограниченное количество ресурсов и библиотек по сравнению с Java;
- иногда возникают сложности при миграции старых Java-проектов.

## 10.Go

Преимущества:

- высокая производительность и компилируемость;
- отлично подходит для разработки серверных приложений;
- встроенная поддержка конкурентности (goroutines).

Недостатки:

- ограниченные возможности ООП;
- меньшее количество библиотек и фреймворков по сравнению с более зрелыми языками;
- не самый удобный язык для разработки сложных GUI-приложений.

C++ отличается своей высокой производительностью и выдающимися возможностями для низкоуровневого программирования, что делает этот язык программирования незаменимым для разработки игр, системного программного обеспечения и программирования в реальном времени. Благодаря этому, он остается одним из наиболее востребованных инструментов в арсенале программистов.

Одним из ключевых преимуществ C++ является наличие большого количества библиотек, которые расширяют функциональность языка и облегчают разработку разнообразных приложений. Эти библиотеки предоставляют готовые решения для множества задач, начиная от обработки графики и заканчивая сложными математическими вычислениями. Кроме того, мощные средства управления памятью, которые предоставляет C++, позволяют разработчикам добиться высокой степени гибкости и контроля над процессом разработки, что особенно важно при создании высокопроизводительных и надежных приложений.

Несмотря на то, что C++ может показаться немного сложным в освоении для начинающих программистов, его преимущества делают этот язык стоящим для изучения. Управление памятью в C++ требует особого внимания и аккуратности, поскольку ошибки в этой области могут привести к утечкам памяти и другим проблемам. Тем не менее, возможность тонкой оптимизации кода, которую предоставляет C++, позволяет разработчикам создавать программы, работающие с максимальной эффективностью. Это делает C++ предпочтительным выбором для разработки критически важных и ресурсоемких проектов, где производительность имеет первостепенное значение.

Таким образом, для решения задачи оптимизации зажигания взрывного вещества (ОЗВБ) с учетом постепенного воспламенения, мы будем использовать C++. Этот язык программирования предоставит нам необходимые инструменты для достижения высокой производительности и надежности системы, что позволит эффективно справляться с поставленной задачей.

Поскольку система будет решена методом СЭЛ, давайте объясним, что это такое.

Совместный метод Эйлера-Лагранжа - это численный метод, который широко используется в вычислительной механике для моделирования сложных взаимодействий между деформируемыми твердыми телами и текучими средами. Этот метод объединяет преимущества двух классических подходов: Эйлера и Лагранжа методов, что позволяет более эффективно решать задачи с большими деформациями и сложными границами.

Основные характеристики и преимущества.

#### 1. Эйлеров подход:

- в данном методе сетка фиксируется в пространстве, а материал течет через ячейки сетки;

- преимущество: хорош для моделирования течений жидкости и газа, так как позволяет легко отслеживать перемещения материала через сетку;
- недостаток: трудно моделировать значительные деформации и изменение формы твердых тел.

## 2. Лагранжев подход:

- в данном методе сетка привязана к материалу, и она деформируется вместе с ним;
- преимущество: такая модель отлично подходит для моделирования деформации твердых тел, так как сетка следует за движением материала;
- недостаток: сетка может сильно искажаться при больших деформациях, что затрудняет численное решение.

Принцип работы СЭЛ метода.

Совместный метод Эйлера-Лагранжа объединяет эти два подхода, устраняя их недостатки и сохраняя преимущества. Вот основные этапы и принципы работы CEL метода.

1. Разделение области моделирования. Область моделирования делится на эйлерову и лагранжеву части. Эйлерова область фиксируется в пространстве и используется для текучих сред (например, жидкостей), тогда как Лагранжева область движется вместе с твердыми телами.

2. Обмен информацией между областями. На границе между Эйлеровой и Лагранжевой областями происходит обмен информацией. Это включает перенос массы, импульса и энергии; Эйлерова сетка отслеживает текучие среды, а Лагранжева сетка отслеживает твердые тела. Взаимодействие между ними моделируется путем передачи сил и скорости на границе.

3. Моделирование взаимодействий. Взаимодействие между твердыми телами и текучими средами моделируется через вычисление контактных сил, которые влияют на движение и деформацию обоих типов материалов.

Иногда используются специализированные алгоритмы, чтобы грамотно учитывать контакты и взаимодействия, включая метод сглаживания (smoothing techniques) для уменьшения численных ошибок.

Преимущества:

- высокая точность моделирования взаимодействий между твердыми телами и текучими средами;
- способность моделировать большие деформации и сложные формы границ;
- возможность выбора методов и алгоритмов для различных задач.

Ограничения:

- высокие вычислительные затраты из-за необходимости обработки двух типов сеток и их взаимодействий;
- сложность реализации и настройки модели, требующая значительных знаний и опыта в области численного моделирования.

Совместный Эйлера-Лагранжев метод является мощным инструментом для численного моделирования сложных взаимодействий между твердыми телами и текучими средами. Его применение охватывает широкий спектр научных и инженерных задач, делая его незаменимым в современных исследованиях и разработках.

«Конденсированное вещество (к-вещество) – обобщенное понятие, которое объединяет большой класс жидких и твердых веществ, способных к экзотермическому реагированию. Термины топливо, горючее и т. п., встречающиеся на страницах книги, используются в общепринятом смысле. Под общим термином «воспламенение к-вещества» обычно понимают два предельных режима протекания экзотермических самоускоряющихся реакций - самовоспламенение и зажигание. При определенных критических условиях можно наблюдать переход от самовоспламенения к зажиганию (и наоборот). Это интересное явление открыто А. Г. Мержановым, Б.Г. Абрамовым, Б.Г. Гонтковской.» [18]

«Самовоспламенение происходит в однородно прогретой массе заряда в случае, если размер сосуда типичен или немного больше размера зоны экзотермических реакций. При этом максимальный разогрев наблюдается в удаленных от поверхности соприкосновения горячей среды и твердого топлива участках.» [19]

«Зажигание происходит обычно в тех условиях, когда существует неоднородность прогрева к-вещества. Для режима зажигания характерен большой градиент температуры между поверхностью и удаленными слоями. Зона наибольшей температуры находится вблизи или на горячей поверхности к-вещества.» [20]

«С чисто формальной точки зрения, резкая граница между этими режимами отсутствует. С некоторой степенью условности к зажиганию можно отнести такие виды режимов воспламенения, для которых скорость реагирования вещества при начальной температуре пренебрежимо мала, а продолжительность воздействия внешнего теплового стимула значительно короче адиабатического периода индукции при этой температуре.» [12]

«Для различных веществ и способов теплопередачи могут возникать случаи, когда удается выделить так называемую ведущую, т.е. обладающую наибольшим весом, определяющую закономерности процесса экзотермическую реакцию. В соответствии с местом локализации ведущей реакции ряд моделей зажигания получили названия твердофазная, гетерогенная и газофазная. Очевидно, что в реальных условиях для многих веществ, способных экзотермически взаимодействовать в газовой и конденсированной фазах, такая идеализация невозможна, и задачу о зажигании придется анализировать с учетом взаимодействия некоторых индивидуальных механизмов.» [12]

«Вместе с тем, для углубленного изучения явления необходимо стремиться к максимально простым постановкам, позволяющим получить легко обзримые результаты, допускающие корректное сравнение теории с экспериментом и ясную физическую интерпретацию. По меньшей мере, в

теории это удастся относительно легко сделать, когда обсуждаются проблемы с очень точной локализацией экзотермических реакций. Для дальнейшего обсуждения удобно ввести понятия различных режимов зажигания. Режимы, когда можно не учитывать выгорание вещества за время зажигания, называют индукционными. Те режимы, где выгорание существенно, называют вырожденными.» [12]

Выводы по второй главе.

В данной главе были проведены детальные исследования с целью определения наиболее эффективного языка программирования для реализации программного решения. После анализа различных аспектов выбора, включая производительность и возможности объектно-ориентированного программирования, было принято решение в пользу языка C++.

Основной метод решения системы уравнений, используемый в программе, был выбран как метод СЭЛ, или совместный Эйлера-Лагранжев метод. Данный метод позволяет моделировать взаимодействие между твердыми телами и текучими средами с высокой точностью и эффективностью. В контексте данного исследования, метод СЭЛ позволяет моделировать взаимодействие между волнами горения и камерой заряда с наибольшей достоверностью.

Отдельное внимание было уделено понятию к-вещества и его воспламенению. К-вещество рассматривается как смесь, способная к экзотермическим реакциям, что определяет процесс возгорания заряда. Изучение этого понятия и термина "воспламенение к-вещества" является важным для правильного моделирования процессов возгорания и учета всех факторов, влияющих на них.

Таким образом, в данной главе были определены основные методы и подходы, которые будут использованы в программе для решения задачи. Выбранные инструменты и методы обеспечивают высокую точность и достоверность результатов моделирования, что является ключевым для успешного решения поставленных задач.

### Глава 3 Обсуждение результатов

Были использованы следующие начальные данные:

$i1 - 1;$

$n3 - 7;$

$n4 - 10;$

$n5 - 10;$

$nnn - 121;$

$k - 13;$

$f1 - 9.000000000000000E+0007;$

$\omega1 - 6.100000000000000E+0000;$

$q - 4.900000000000000E+0000;$

$rr - 6.000000000000000E-0001;$

$ksy - 7.000000000000000E-0001;$

$\vartheta - 2.000000000000000E-0001;$

$nLk - 6.940000000000000E+0000;$

$nSk - 8.180000000000000E-0001;$

$dnd - 7.178567000000000E-0001;$

$dd - 1.600000000000000E+0000;$

$da - 9.800000000000000E-0001;$

$f - 9.000000000000000E+0007;$

$a1 - 8.333000000000000E-0008;$

$pn - 9.810000000000000E+0003;$

$pp - 3.000000000000000E+0006;$

$pb - 6.000000000000000E+0006;$

$ff - 3.000000000000000E+0006;$

$dk0 - 7.249000000000000E-0001;$

$d10 - 1.724000000000000E-0001;$

$n1 - 1.710000000000000E-0001;$

$ndr - 7.750000000000000E-0002;$

d - 7.200000000000000E-0003;  
nm - 7.000000000000000E+0000;  
nld - 4.746000000000000E+0001;  
ndk - 1.290000000000000E+0000;  
d1 - 1.025000000000000E+0000;  
r4 - 5.270000000000000E+0000;  
r5 - 6.270000000000000E+0000;  
r6 - 8.900000000000000E+0001;  
r7 - 9.050000000000000E+0001;  
W0 - 8.497517000000000E+0000;  
r1 - 1.000000000000000E+0000;  
r2 - 3.000000000000000E+0002;  
r3 - 0.0E+00;  
dp - 3.141590E+00;  
dp1 - 0.0E+00;  
dp2 - 1.0E+00;  
e1 - 7.0E-03;  
dw1 - 7.500E-02;  
dw2 - 7.500E-02;  
dw3 - 0.0E+00;  
e2 - 5.0E-03;  
dk2 - 3.0E+003;  
dl2 - -1.0E+003;  
dm2 - 3.330E-001;  
a4 - 1.330E-003;  
nm0 - 4.400E-001;  
f2 - 2.940E+007;  
dd2 - 1.600E+003;  
db0 - 5.0E-001;  
t2 - 5.0E-004;

nt2 - 2.420E+003.

Была просчитана модельная задача для определения параметров в предварительном периоде. В качестве инициирующего состава использовался порох 14/7. Были получены значения времён воспламенения по длине заряда. При разбиении камеры системы на 14 точек полученные значения представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Динамика распространения волны горения по заряду

X, дм	n	t, с
0.533	1	2.86E-004
1.067	2	4.45E-004
1.601	3	6.20E-004
2.135	4	7.90E-004
2.669	5	9.55E-004
3.203	6	1.16E-004
3.737	7	1.36E-004
4.270	8	8.85E-004
4.804	9	1.07E-004
5.338	10	1.25E-004
5.872	11	1.41E-004
6.406	12	1.56E-004
6.940	13	1.67E-004

Как итог, видно, что заряд распространяется равномерно по времени по всему заряду.

Таблица отображает динамику распространения волны горения по заряду. В столбцах представлены следующие данные:

- X, дм: отрезок снаряда в дециметрах с начальной точкой в виде дна камеры заряда;
- n: номер отрезка снаряда;
- t, с: время, соответствующее моменту зажигания каждого отрезка заряда X.

Анализ таблицы:

- Волна горения распространяется по заряду равномерно;

- Время  $t$  линейно увеличивается с увеличением положения  $X$ ;
- Расстояние между соседними измерениями  $X$  примерно одинаково, что подтверждает равномерность распространения волны.

Выводы по третьей главе.

В данной главе был проведён анализ результатов работы сделанной программы. В качестве начальных параметров был взят порох 14/7, то есть был взят порох с толщиной горящего свода 1.4 миллиметра, а зёрна пороха были с 7 каналами. Это бездымный порох, который широко применяется в стрелковом оружии и артиллерии.

Для расчёта искомых данных был взят предварительный период, который обычно опускается ввиду сложности вычислений, но является важным, поскольку занимает существенную часть выстрела. При заданных начальных данных были высчитаны моменты возгорания по камере заряда и были получены данные, представленные в таблице. После получения данных в таблице был проведён анализ, в результате которого было получено, что волна горения распространяется по заряду равномерно, без промедлений или резких ускорений.

## Заключение

В этой работе рассматриваются основные аспекты, касающиеся постепенного воспламенения и предварительного периода выстрела. Первичные результаты указывают на то, что механизм воспламенения в импульсной системе включает несколько критических стадий, каждая из которых существенно влияет на эффективность и стабильность работы всей системы.

Анализ постепенного воспламенения позволил обнаружить, что начальная фаза воспламенения отличается равномерным повышением температуры и давления. Эта фаза очень важна для обеспечения устойчивости системы, так как резкое увеличение данных параметров может привести к неустойчивости и возможному разрушению компонентов. Постепенное повышение температуры в этот период способствует более равномерному и контролируемому воспламенению топливно-воздушной смеси.

Исследование времени воспламенения в предварительном периоде выстрела показало важность предварительного периода для оптимизации временных свойств системы. Период до выстрела предполагает этап подготовки топливно-воздушной смеси и предварительное нагревание её до температур близких к условиям вспышки. Этот период позволяет системе достичь необходимых параметров для инициирования воспламенения с минимальными задержками и максимальной эффективностью. Установлено, что точная регулировка времени и условий предварительного периода выстрела является ключевым фактором для достижения устойчивого и мощного воспламенения.

В результате проведенной работы были рассчитаны важные данные, которые играют ключевую роль в улучшении процесса постепенного зажигания. Полученные выводы исследования демонстрируют значимость тщательного и непрерывного мониторинга, а также точного регулирования процессов, которые происходят как во время постепенного зажигания, так и в

предварительный период перед выстрелом. Это позволяет существенно повысить общую производительность и надежность системы.

Исследование показало, что каждая стадия постепенного зажигания имеет свои особенности и требует отдельного внимания для оптимизации параметров работы системы. Тщательный анализ и контроль этих процессов могут предотвратить возможные сбои и увеличить срок службы оборудования. Это особенно важно в условиях, когда надежность и стабильность работы системы являются критически важными параметрами.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что дальнейшие исследования в этом направлении могут внести значительный вклад в разработку новых технологий. Эти технологии смогут обеспечить более эффективное и безопасное управление процессами воспламенения. Кроме того, результаты данного исследования могут быть использованы для улучшения существующих методов управления, что позволит добиться еще большей точности и эффективности работы системы.

## Список используемой литературы

1. Блинников В.И. Методика построения структурных матриц / В.И. Блинников [и др.]. – М.: ВНИИПИ, 1983. – 38 с.
2. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. – 720 с.
3. Вилюнов В.Н. Теория зажигания конденсированных веществ. Новосибирск: Наука, 1984. 189 с.
4. Володин А.И. Локомотивные двигатели внутреннего сгорания. – М.:Транспорт, 1978. – 320 с.
5. Вольнов А.С. О системном подходе к оценке влияния автотранспортных средств в процессе эксплуатации на экологию городов / А.С. Вольнов, Л.Н. Третьяк // Вестник Оренбургского государственного университета. - 2014. - №1. - С. 161-166.
6. Двигатели внутреннего сгорания. Методические указания к выполнению расчетно-графического упражнения./Сост. Ю.Н. Сырямин, А.П. Ткачук. Новосибирск, 1998. 13с
7. Дроздов Н. Ф. Решение задач внутренней баллистики для бездымного пороха // Арт. Журн. 1903. № 5. С. 497 – 503.
8. Газодинамические основы внутренней баллистики/ С.А.Бетехтин, А.М.Виницкий, М.С.Горохов, К.П.Станюкович и др. – М.:Оборонгиз, 1957.– 384с.
9. Исследование влияния типа систем наддува 40 на эффективные показатели восьмицилиндрового V-образного транспортного дизеля: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Харьков, 1981. – 20 с.
10. 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 быстропотекающих процессов. Томск, изд.ТГУ, 1979, с.35–39.

11. Коладе Бабаджиде, Томас Морел, Сонг-Чарнг Конг. Coupled 1- D/3-D Analysis of Fuel Injection and Diesel Engine Combustion // SAE Tech. Pap. Ser. – 2004. – N 2004-01-0928. – P. 1-10.

12. О зажигании конденсированных веществ лучистой энергией: выпускная бакалаврская работа по направлению подготовки: 24.03.03 - Баллистика и гидроаэродинамика

13. Павличенко А.М., Жуков В.П. Расчетный анализ теплопередающей функции на параметры рабочего цикла ДВС // Труды НКИ (Николаев). – 1975.– Вып. 100.– С. 103-107.

14. Пелепейченко В.И. Исследование влияния типа систем наддува 40 на эффективные показатели восьмицилиндрового V-образного транспортного дизеля: Автореферат диссертации ... кандидата технических наук.– Харьков, 1981.– 20 с.

15. Русяк И.Г., Ушаков В.М. Внутрикамерные гетерогенные процессы в ствольных системах [Текст]: монография / И.Г. Русяк, В.М. Ушаков.– Екатеринбург: УрО РАН, 2001.– 259 с.

16. Automotive Technology: Principles, Diagnosis, and Service" by James D. Halderman (6th Edition, Pearson, 2019), глава 3 "Engine Operation and Service.

17. Clean Code: A Handbook of Agile Software Craftsmanship / ed. By Robert C. Martin.– USA: Prentice Hall, 2008.– 464 p.

18. Internal Combustion Engine Fundamentals" by John Heywood (2nd Edition, McGraw-Hill, 1998), chapter 5 "Air-Fuel Ratio and Engine Performance.

19. Internal Combustion Engine Fundamentals" by John Heywood (2nd Edition, McGraw-Hill, 1998), chapter 2 "Engine Cycles and Cylinder Operations

20. Spring in Action / ed. By Walls Craig. – USA: Manning Publications. 2011 – 424 p.