

УДК 662.215.5+534.222.2

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА С ВЫСОКОПЛОТНЫМ ЗАРЯДОМ КОНВЕКТИВНОГО ГОРЕНИЯ

© 2002 г. Б. С. Ермолаев, А. А. Сулимов, А. В. Романьков

Институт химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, Москва

Поступила в редакцию 23.01.2001

В статье рассматривается конвективное горение и внутрибаллистический процесс применительно к ствольной системе, снаряженной высокоплотным зарядом конвективного горения (ВЗКГ) – прессованным зарядом, который изготовлен из пороховых зерен, ингибированных пленочным покрытием. Предложена модель конвективного горения ВЗКГ в условиях выстрела. Разработана компьютерная программа расчета внутрибаллистических параметров. При разработке программы использована классическая модель выстрела, модифицированная с тем, чтобы учесть эффекты постепенного воспламенения ВЗКГ в режиме конвективного горения и охвата горением наружной поверхности зерен пороха, покрытых пленкой ингибитора. Проведено тестирование программы с помощью экспериментов, выполненных в лабораторной ствольной установке при изменении в широком диапазоне параметров установки, веса и свойств ВЗКГ. Результаты тестирования демонстрируют возможность получения удовлетворительного согласия по параметрам выстрела и диаграмме давление–время во всех рассмотренных примерах. Анализ обнаружил высокую прогрессивность горения ВЗКГ, которая обеспечивается за счет постепенности воспламенения заряда в режиме конвективного горения и охвата горением воспламенившегося порохового зерна. Однако не удалось воспроизвести все опыты с единым набором входных параметров, описывающих свойства моноблока, и для получения согласия в некоторых опытах варьировались коэффициенты, описывающие постепенный охват зерна горением.

ВВЕДЕНИЕ

В статье рассматривается конвективное горение и внутрибаллистический процесс применительно к ствольной системе, снаряженной прессованным зарядом, который изготовлен из пороховых зерен, ингибированных пленочным покрытием из инертного материала. Такие заряды, получившие название “высокоплотные заряды конвективного горения” [1], позволяют одновременно увеличить плотность заряжения и прогрессивность горения, что является эффективным средством улучшения характеристик выстрела [2–5]. Высокоплотные заряды конвективного горения (ВЗКГ) воспламеняются и горят при выстреле иначе, чем обычные зерненные пороховые заряды насыпной плотности. Из-за высокой плотности заряда и наличия пленки ингибитора воспламенение заряда замедляется. В результате время, необходимое для того, чтобы фронт воспламенения, распространяющийся в режиме конвективного горения, охватил весь заряд, уже не является пренебрежимо малым по сравнению с временем горения пороховых зерен, как это имеет место в случае обычных пороховых зарядов. Кроме того, ингибированное пороховое зерно, оказавшееся за фронтом воспламенения, начинает гореть не по всей наружной поверхности, а лишь по ее небольшой части. Из-за этого охват поверхности поро-

хового зерна горением происходит постепенно, с нарастающей прогрессивностью.

Опубликовано несколько работ по воспламенению и горению ВЗКГ [6–10], которые позволяют составить представление о механизмах и закономерностях этих процессов и методологии исследований. Для исследований эффективным оказался комплексный подход, включающий численное моделирование, проведение испытаний в манометрической бомбе, камере конвективного горения с дожигательной секцией и лабораторной баллистической установке, а также контроль свойств и однородности покрытия. Теоретическая модель конвективного горения ВЗКГ [10] находится в удовлетворительном согласии с экспериментальными данными. Однако некоторые сложные процессы, например постепенность охвата ингибированных зерен горением, пока не имеют полного адекватного теоретического описания и могут моделироваться лишь с использованием полуэмпирического подхода.

Баллистический эксперимент и его обработка с использованием теоретической модели внутренней баллистики являются важной составной частью исследования горения порохового заряда [2, 7, 11]. На разных этапах исследования находят применение модели разной сложности. В классических термодинамических моделях выстрела ис-

пользуются предположения о геометрическом законе горения пороховых зерен и давлении, осредненном по всему заснарядному пространству [2, 11]. В газодинамических одномерных и двумерных моделях рассматривается распределение характеристик течения газопороховой смеси по камере и стволу и физические процессы, происходящие при воспламенении порохового заряда [7, 12].

Существующие модели внутренней баллистики не учитывают особенности воспламенения и горения ВЗКГ и должны быть соответствующим образом модифицированы. Проведенные нами исследования и модель конвективного горения ВЗКГ [6, 8–10] закладывают научную основу для такой модификации. Однако сложность и иногда недостаточная изученность рассматриваемых процессов, их зависимость от большого числа различных параметров и свойств заряда, зерна и ингибитора делают нецелесообразным вести разработку баллистической модели ВЗКГ с использованием детального газодинамического описания. Расчеты с использованием такой модели потребуют значительных затрат времени, результаты расчетов будет трудно интерпретировать. В настоящее время более эффективной представляется модель, в которой учет особенностей горения и воспламенения ВЗКГ осуществляется с использованием полуэмпирических корреляционных зависимостей. Такие зависимости должны иметь ясный физический смысл, надежно обобщать экспериментальные и расчетные данные в некотором достаточно представительном диапазоне изменения основных параметров заряда, зерна и ингибитора и включать согласующие коэффициенты для того, чтобы можно было легко осуществлять корректировку основных количественных показателей.

Данная статья посвящена разработке и анализу модели внутренней баллистики ВЗКГ. При разработке модели использована классическая модель выстрела [2, 11], основанная на баллистическом приближении с давлением, осредненным по всему заснарядному пространству, и модифицированная с тем, чтобы учесть эффекты, присущие ВЗКГ, а именно, эффекты постепенности воспламенения порохового заряда в режиме конвективного горения и охвата горением наружной поверхности пороховых зерен, покрытых пленкой ингибитора. Для модификации использованы полуэмпирические зависимости, установленные в предыдущих экспериментальных и теоретических исследованиях, которые определяют в обобщенном виде связь этих эффектов с давлением и свойствами ингибитора, зерна и заряда. Модель реализована в виде программы для персонального компьютера, которая позволяет рассчитать характеристики выстрела за несколько секунд. Это дает возможность быстро варьировать и определить влияние большого числа начальных параметров задачи. Рассмотрены результаты тестирования програм-

мы с использованием экспериментальных данных. Модель предназначена для первичного анализа результатов баллистических испытаний, анализа влияния основных параметров экспериментальной установки, заряда, зерна и ингибитора на характеристики выстрела и оценки эффективности ВЗКГ путем сопоставления с характеристиками выстрела для обычного заряда насыпной плотности из зерен без пленки ингибитора.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МОДЕЛИ

1. Пороховой заряд состоит из двух частей: моноблока в виде цилиндра или цилиндра с каналом, который изготавливается из бесканальных или канальных зерен пороха, покрытых по наружной поверхности пленкой ингибитора, и добавки зерен пороха без пленки в виде россыпи.

2. Горение заряда инициируется срабатыванием воспламенителя, который создает в камере давление, достаточное для начала процесса воспламенения насыпной части заряда, но меньшее давления форсирования.

3. Среднее давление в заснарядном пространстве изменяется в соответствии с классическим уравнением Резаля (уравнение пиродинамики классической внутренней баллистики [2, 11]). Однако геометрический закон газообразования при горении моноблока модифицируется с тем, чтобы учесть особенности воспламенения и горения моноблока, связанные с наличием пленки ингибитора на поверхности зерен:

а) моноблочный заряд воспламеняется постепенно в волне конвективного горения, бегущей по заряду; скорость конвективного горения есть эмпирическая функция давления с коэффициентами, зависящими от свойств зерна, заряда и количества ингибитора [9, 10];

б) за фронтом конвективного горения, бегущего по моноблоку, наружная поверхность зерен охватывается горением постепенно: характеристики этого процесса определяются в соответствии с установленной ранее обобщенной экспериментальной зависимостью; последняя связывает долю наружной поверхности зерен, охваченной горением, с временем, которое отсчитывается от момента прохождения фронта конвективного горения, и толщиной пленки ингибитора [9, 10].

Каналы, имеющиеся в зерне, не обладают какими-либо особенностями, требующими специального рассмотрения. Поверхность каналов автоматически учитывается через характеристики зерна.

Насыпная часть заряда воспламеняется одновременно по всей поверхности зерен в момент срабатывания воспламенителя. Конвективное воспламенение моноблока начинается с некоторой задержкой с поверхности, доступной для действия

продуктов сгорания воспламенителя и насыпной части заряда.

4. В результате этой модификации количество сгоревшего пороха становится функцией времени и координаты моноблока. Эта координата выбирается по радиусу цилиндра в случае моноблока вестороннего горения. В случае моноблока одностороннего горения (т.е. моноблока, у которого боковая поверхность не имеет прямого контакта с продуктами сгорания, например, покрыта слоем бронирования, и который поджигается с открытого торца) эта координата выбирается вдоль оси заряда.

5. Процесс газификации (удаления) пленки ингибитора отдельно не рассматривается. Поэтому термодинамические характеристики продуктов горения используются как средние для композиции "порох с добавкой ингибитора".

6. Движение метаемого тела начинается после того, как давление в камере превысит давление форсирования, и рассматривается по упрощенной схеме, основанной на использовании постоянного коэффициента фиктивности.

УРАВНЕНИЯ МОДЕЛИ

Пусть заданы W_0 – объем зарядной камеры; ω и ω_c – вес моноблока и насыпной части заряда, соответственно; R_c – характерный размер моноблока; L_d и S_d – длина и площадь поперечного сечения ствола, соответственно; q – вес метаемого тела. Размер R_c зависит от формы моноблока и определяет расстояние, которое проходит фронт конвективного горения по моноблоку. Так, например, если моноблок представляет собой цилиндр, вся наружная поверхность которого доступна для действия воспламеняющих газов, то R_c равен радиусу цилиндра. Если цилиндр имеет осевой канал, то R_c равен половине толщины свода. Наконец, если для воспламеняющих газов доступен только один торец цилиндра, то R_c равен длине моноблока.

Введем пространственную координату L , отсчитываемую вдоль ствола от дна метаемого тела, и координату R , которая отсчитывается по направлению распространения фронта конвективного горения вдоль моноблока. Перейдем к безразмерным координатам $X = L/L_d$ и $Y = R/R_c$. Таким образом, $X = 0$ отвечает начальному положению метаемого тела, $X = 1$ – срезу ствола, а $Y = 0$ и $Y = 1$ – начальному и конечному положению фронта конвективного горения вдоль выбранной координаты моноблока.

Пусть Y_f – координата фронта воспламенения вдоль оси Y . Тогда доля моноблока, охваченная горением, определяется по формуле

$$M_f = \kappa_c Y_f (1 + \lambda_c Y_f + \mu_c Y_f^2). \quad (1)$$

Здесь κ_c , λ_c , μ_c – коэффициенты формы заряда, которые вычисляются в соответствии с обычной процедурой, принятой в баллистике при анализе горения порохового зерна разной формы [2]. Например, в случае цилиндра с каналом, который воспламеняется по всей поверхности и имеет отношение толщины свода к длине цилиндра, равное β , $\kappa_c = 1 + \beta$, $\lambda_c = -\beta/(1 + \beta)$, $\mu_c = 0$.

Введем долю массы моноблока $\Psi(t)$, сгоревшей к моменту времени t и отнесенной к исходной массе моноблока ω . Если $\eta(Y, t)$ есть доля пороха, сгоревшего в слое с координатой Y и толщиной dY , то выполняется очевидная связь:

$$\Psi(t) = \int_0^{Y_f} \eta \kappa_c (1 + 2\lambda_c Y + 3\mu_c Y^2) dY. \quad (2)$$

Величина η связана с долей сгоревшего свода порохового зерна, образующего моноблок ($Z = e/e_1$, $1 \geq Z \geq 0$), известной зависимостью:

$$\eta = \kappa Z (1 + \lambda Z + \mu Z^2). \quad (3)$$

Здесь κ , λ , μ – коэффициенты формы зерна, которые, как и коэффициенты формы моноблока, вычисляются в соответствии с обычной процедурой, принятой в баллистике [2].

Изменения координаты фронта воспламенения и доли сгоревшего свода определяются обыкновенными дифференциальными уравнениями:

$$dY_f/dt = \begin{cases} 0, & t < t_{ig}, \\ W/R_c, & \end{cases} \quad (4)$$

$$dZ/dt = \begin{cases} 0, & Y > Y_f, \\ U_p G(t - t^*)/e_1, & Y \leq Y_f. \end{cases} \quad (5)$$

Здесь t_{ig} – задержка начала конвективного горения моноблока и W – скорость конвективного горения, способ вычисления которых рассматривается ниже; $U_p = BP^n$ – скорость послыоного горения пороха, являющаяся известной функцией давления P ; $G(\tau) = \Sigma_0 + g\tau$ – переходная функция, учитывающая постепенность охвата горением поверхности ингибированных зерен ($\Sigma_0 \leq G(\tau) \leq 1$); t^* – момент прихода фронта воспламенения в слой моноблока с координатой Y .

Сгоревшая доля насыпной части заряда $\Psi_2(t)$ определяется уравнением

$$\Psi_2 = \kappa_2 Z_2 (1 + \lambda_2 Z_2 + \mu_2 Z_2^2), \quad (6)$$

в которое, помимо $Z_2 = e_2/e_{1,2}$ – доли сгоревшего свода зерен насыпной части заряда, входят также соответствующие коэффициенты формы зерна.

Движение метаемого тела определяется уравнением

$$d^2X/dt^2 = \begin{cases} 0, & P < P_f, \\ S_d P / L_d \varphi q. & \end{cases} \quad (7)$$

Здесь P_f – давление форсирования, а коэффициент фиктивности в соответствии с [2] равен

$$\varphi = F_{jit}(1.06 + \omega/3q), \quad (8)$$

где коэффициент $F_{jit} \sim 1$ дополнительно введен для более точного согласования расчетной и экспериментальной дульной скорости.

Давление P определяется уравнением, аналогичным известному уравнению Резаля [2]:

$$P - P_0 = [f\omega\Psi + f_2\omega_2\Psi_2 - (\gamma - 1)\varphi q U^2/2] / \{ W_0 + \omega[M_f(1/\rho_c - 1/\rho_0) - 1/\rho_c + \Psi(1/\rho_0 - \alpha) + \omega_2\Psi_2(1/\rho_{02} - \alpha_2) + S_d L_d X] \}. \quad (9)$$

Здесь $U = L_d(dX/dt)$ – скорость метаемого тела; P_0 – начальное давление, создаваемое при сгорании воспламенителя; γ – показатель политропы продуктов горения; f – сила пороха; α – коволюм; ρ_0 – плотность пороха; ρ_c – плотность моноблока. Кроме того, в знаменателе введен дополнительный член (первое слагаемое в квадратных скобках), который учитывает, что поры, содержащиеся в моноблоке, включаются в объем, занятый газами, по мере того, как фронт конвективного горения распространяется по заряду.

Система уравнений (1)–(9) решается при следующих начальных условиях: при $t = 0$

$$Y_f = X = Z = Z_2 = 0, \quad (10)$$

$$\Psi = \Psi_2 = 0, \quad P = P_0.$$

Решение заканчивается, когда метаемое тело достигает среза ствола:

$$X = 1. \quad (11)$$

Теперь рассмотрим более подробно зависимости, которые использовались для учета эффекта ингибирования.

СВОЙСТВА ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ

Добавка ингибитора снижает потенциал, силу пороха и температуру горения и увеличивает показатель адиабаты. Термодинамические расчеты позволяют количественно выразить эти зависимости. Изменение силы пороха в программе представлено с помощью следующей формулы:

$$f = f_0(1 - a_2 m_b), \quad (12)$$

где f_0 – сила пороха без добавки ингибитора, m_b – массовая доля ингибитора, а a_2 – коэффициент, численное значение которого для типичного ингибитора, в качестве которого выбран поливинилбутираль, принято равным 1.43.

СКОРОСТЬ КОНВЕКТИВНОГО ГОРЕНИЯ

Влияние ингибитора пленочного типа на скорость конвективного горения анализировалась нами ранее в [9, 10]. Обобщением экспериментальных, расчетных и аналитических данных может служить формула

$$W^3 = \frac{d_p f}{4b_1 \zeta (1 + \zeta)^2 t_p}. \quad (13)$$

Здесь d_p – диаметр пор; b_1 – второй коэффициент в двучленной формуле фильтрации Эргана, который в принятых переменных можно принять равным 0.3 [13]; t_p – характерное время нарастания давления; ζ – безразмерный параметр, характеризующий эффект затрат тепла, необходимых для удаления пленки ингибитора:

$$d_p = \frac{4}{S_0 \sigma_0} \left(\frac{1}{\rho_c} - \frac{1}{\rho_0} \right), \quad (14)$$

$$\zeta = \frac{8(\gamma - 1)G_b}{d_p P}. \quad (15)$$

Здесь S_0 – удельная поверхность зерна (в м²/кг), а σ_0 – коэффициент, меньший единицы, который учитывает, что для высокоплотного заряда поверхность пор меньше, чем поверхность зерен, образующих заряд, на величину, равную поверхности пятен контакта соседних зерен. Для вычисления этого коэффициента используется аппроксимационная формула, которая соответствует результатам теоретического анализа регулярных упаковок, состоящих из пластически деформируемых зерен одинакового размера:

$$\sigma_0 = a_0 \sqrt{\Phi_0}, \quad (16)$$

где Φ_0 – пористость заряда; a_0 – константа, принятая равной 0.34. Далее, G_b – количество тепла (в Дж/м²) на единицу поверхности пор, необходимое для воспламенения ингибированного пороха. Согласно критерию воспламенения пороха [14] и простейшей модели этого процесса применительно к пороху, ингибированному пленкой полимера, величина G_b состоит из двух слагаемых. Первое слагаемое есть тепло, необходимое для удаления (термического разложения) пленки ингибитора, а второе – тепло, необходимое для создания в слое пороха под пленкой теплового слоя волны горения пороха. В результате получим

$$G_b = m_b Q_b / S_0 + \lambda_p (T_i - T_0) / 2 U_p. \quad (17)$$

Здесь Q_b – количество тепла (в Дж/кг), необходимого для удаления пленки ингибитора, которое включает затраты тепла на нагрев до температуры разложения и теплоту эндотермического эффекта разложения; λ_p , T_i и T_0 – коэффициент теплопроводности, температура на поверхности горения и начальная температура пороха, соответственно.

В программе для расчета скорости конвективного горения формула (13) используется в следующем виде:

$$W = C_{CB} \left(\frac{d_p/d_{p0}}{\zeta(1+\zeta)^2} \right)^{1/3} \quad (18)$$

Здесь коэффициент $d_{p0} = 10^{-4}$ м введен для удобства с тем, чтобы основной коэффициент, C_{CB} , имел размерность скорости (в м/с). Согласно формуле (18), скорость конвективного горения изменяется по мере увеличения давления в камере. Для согласования с реперными (например, экспериментальными) данными служат два параметра: C_{CB} – для согласования по уровню скорости конвективного горения и Q_b – для согласования по зависимости от давления.

Выбор этих параметров иллюстрирует следующий пример. Согласно экспериментальным данным, для ВЗКГ с начальной пористостью 0.05, изготовленного из пороха ВУ ($S_0 = 8.5$ м²/кг), для скорости конвективного горения выведена следующая эмпирическая формула: $W = 1.181P^{0.517}$ (скорость – в м/с и давление – в атм). Взяв в качестве реперного давления 38 МПа и $a_0 = 0.24$, получим $\zeta = 0.38$, $Q_b = 0.1526$ МДж/м² и $C_{CB} = 26.4$ м/с.

ЗАДЕРЖКА НАЧАЛА КОНВЕКТИВНОГО ГОРЕНИЯ МОНОБЛОКА

Используя тот же подход, что и при расчете скорости конвективного горения, для оценки задержки начала этого процесса нужно определить момент, когда запас тепла, созданный на стадии инертного нагрева поверхности пор горячими газами воспламенителя, достигнет величины G_b . Изменение запаса тепла во времени определяется формулой конвективной теплопередачи:

$$Q(t) = \int_0^t \alpha_s (T_g - T_{ks}) dt. \quad (19)$$

Здесь коэффициент теплопередачи α_s вычисляется через критерий Нуссельта, T_g – температура газов и T_{ks} – температура поверхности пор. Используя для теплопередачи в порах линейную связь между числами Нуссельта и Рейнольдса: $Nu = B_N Re$, где B_N – константа, равная 0.08 [15], окончательно имеем

$$\alpha_s = \frac{\lambda_g Nu}{d_p} = \frac{\lambda_g B_N \rho_g U_g}{\mu_g}, \quad (20)$$

где λ_g – теплопроводность, ρ_g – плотность, μ_g – вязкость и U_g – скорость газов, фильтрующихся в поры.

Для оценки плотности газа примем, что газы, втекающие в поры, имеют температуру, равную адиабатической температуре горения пороха в

россыпи. Следовательно, $\rho_g = P/f_2$. Далее, из анализа формул, позволяющих оценить скорость газов, втекающих в поры [9], можно сделать вывод, что на стадии задержки воспламенения U_g является величиной, которая почти не изменяется во времени и сравнительно слабо зависит от условий втекания и свойств газа. Так, если сгорание воспламеняющего пороха создает в камере повышенные давления с характерным временем t_p , то

$$U_g^3 \approx \frac{d_p f_2}{4b_1 t_p}. \quad (21)$$

Видно, что скорость газов слабо зависит (как корень кубический) от определяющих параметров: диаметра пор, силы пороха и темпа роста давления. Оценка при диаметре пор 0.1 мм и характерном времени 0.5 мс дает скорость газов 44 м/с. В данной модели по аналогии с формулой (18) использовано следующее выражение:

$$U_g = a_u C_{CB} (d_p/d_{p0})^{1/3}. \quad (22)$$

Здесь a_u – константа ~ 1 , которая будет далее включена в единый согласующий коэффициент. Подставляя все это в формулу (19) и делая соответствующие преобразования, получим окончательную оценку для времени задержки t_{ig} :

$$\int_0^{t_{ig}} P dt = a_q \frac{(\gamma - 1) G_b}{B_N U_g}. \quad (23)$$

Здесь для упрощения окончательного выражения использованы следующие равенства, справедливые по порядку величины: $\lambda_g/c_p \mu_g = 1$, $c_p(T_g - T_{ks})/f_2 = 1$. Соответственно, для компенсации в формулу введен коэффициент a_q , который можно использовать в качестве согласующегося параметра, если известны экспериментальные данные. Согласно оценкам, типичное значение $a_q \sim 10$.

ПОСТЕПЕННЫЙ ОХВАТ ГОРЕНИЕМ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕРНА

Принято считать [2], что в случае обычного заряда горение порохового зерна происходит сразу по всей его поверхности. В отличие от этого, в случае ВЗКГ гореть начинает часть наружной поверхности зерна, и лишь спустя некоторое время горение охватывает всю поверхность [1, 9]. Это вызвано двумя причинами: а) из-за высокой плотности заряда часть поверхности зерен оказывается закрытой от действия горячих газов пятнами контакта с соседними зернами; б) воспламенение поверхности пороха, покрытой пленкой ингибитора, происходит в отдельных очагах, скорее всего, в местах неровностей и дефектов пленки. Объединение отдельных очагов в общую поверхность горения зависит от ряда физико-химических процессов, включая процесс диспергирования

заряда на отдельные зерна, и занимает тем больше времени, чем при прочих равных условиях толще пленка ингибитора.

Процесс охвата горением поверхности ингибированного зерна пока не имеет полного теоретического описания. Для моделирования этого процесса в программе использован подход изложенный нами ранее в [10] и являющийся обобщением экспериментальных зависимостей. Предполагается, что в момент воспламенения (t^*) зерно начинает гореть не по всей поверхности, а лишь по ее части (начальная относительная доля Σ_0). Согласно экспериментальным данным, величина Σ_0 тем меньше, чем ниже начальная пористость. В программе использована следующая зависимость

$$\Sigma_0 = a_e \sqrt{\Phi_0}, \quad (24)$$

где a_e – эмпирический коэффициент, равный или меньше a_0 из формулы (16). С течением времени доля горячей поверхности увеличивается согласно переходной функции

$$G(\tau) = \Sigma_0 + g(t - t^*), \quad (25)$$

где коэффициент g обратно пропорционален толщине пленки ингибитора, h_b :

$$g = \frac{1 - \Sigma_0}{a_1 h_b}. \quad (26)$$

Здесь

$$h_b = \frac{m_b}{S_0 \rho_b}, \quad (27)$$

а a_1 – коэффициент, зависящий от качества покрытия и используемый для согласования с экспериментальными данными. Типичные значения этого коэффициента для ингибитора типа поливинилбутираль [10] составляют от 40 до 100 с/м; это означает, что охват зерна горением при толщине пленки ингибитора 5 мкм завершается за время 0.2–0.5 мс.

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ И СОПОСТАВЛЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

Система уравнений, представленная выше, решалась численно с использованием метода “предиктор–корректор”. Компьютерная программа написана на языке “Visual Basic Version 4.0”. Программа считывает исходные данные расчетного варианта из входного файла, производит необходимые вычисления и выводит результаты расчетов в виде таблиц в выходной текстовой файл и в виде краткой информации на рабочее окно монитора.

Расчет одного варианта на компьютере PC Pentium занимает не более десяти секунд. Для тестирования программы был использован вариант

заряда с постоянной поверхностью горения для зерна без ингибитора, который в рамках классической модели внутренней баллистики имеет аналитическое решение [2].

Входные данные программы включают характеристики баллистической установки, свойства порохового зерна и характеристики моноблока. В принципе, предполагается, что все они могут быть найдены из независимых измерений. Однако, учитывая сложный характер процесса воспламенения и горения моноблока и упрощенный характер модели, трудно рассчитывать на получение хороших результатов без использования согласующих параметров.

Чтобы получить представление о возможностях и недостатках модели, ниже рассмотрены результаты сопоставления компьютерного моделирования с экспериментальными данными, полученными в лабораторной баллистической установке. Использовалась гладкоствольная установка со сменными зарядными камерами. Форсирование обеспечивалось форсажными мембранами из дуралюмина, для исключения протечек газа использовалась обтюрирующая юбка. Метаемое тело представляло собой стальной цилиндр нужного веса и размеров. Воспламенение заряда осуществлялось с помощью болта-воспламенителя, содержащего электровоспламенитель МБ-2 и навеску измельченного дымного пороха. Регистрировали кривую давление–время со помощью пьезокварцевого датчика, размещаемого в зарядной камере, и дульную скорость рам-мишенным методом на расстоянии 2–4 м от дульного среза. Сигнал с пьезодатчика записывался на осциллографе ОК-40 или регистраторе переходных процессов DATALAB-2000, сигналы с рам-мишени регистрировали с помощью баллистических частотометров.

Всего представлено 6 экспериментов, в которых в широком диапазоне варьировались параметры баллистической установки, вес и свойства моноблочного заряда. Моноблочные заряды изготавливали методом прессования из одноканальных зерненных пироксилиновых порохов, покрытых по боковой поверхности полимерным покрытием из поливинилбутирала (ПВБ). Условия и результаты экспериментов приведены в табл. 1. Примеры экспериментальных диаграмм давление–время приведены на рис. 1, 2. Примем опыт № 1 (табл. 1) в качестве базового эксперимента. В этом опыте ствол имел калибр 1.45 см и длину 1.5 м, камера имела диаметр 1.94 см и объем 9.5 см³, моноблок имел форму цилиндра диаметром 1.8 см и длиной 2.95 см, его вес и плотность равнялись 11 г и 1.51 г/см³, соответственно. Моноблок был изготовлен из зерен пироксилинового пороха марки ВУ с толщиной свода 0.225 мм, покрытых пленкой 3%-ного ПВБ. В качестве навески части заряда использовалась навеска 1 г

Таблица 1 Условия и результаты экспериментов в баллистической установке, использованные для сопоставления с результатами численного моделирования

Опыт №	Варьируемые параметры	Плотность заряжания, г/см ³	Максимальное давление, МПа	Дульная скорость, м/с	Импульс давления, МПа·с
1	–	1.26	601	1240	215
2	$\rho_c = 1.23 \text{ г/см}^3$, $\omega = 9 \text{ г}$, $q = 18.6 \text{ г}$	1.05	391	1200	142.8
3	1.5% ПВБ, $q = 13.9 \text{ г}$	1.26	431	1540	
4	$q = 9.68 \text{ г}$, $D = 1.35 \text{ см}$, $L_d = 0.65 \text{ м}$, $W_0 = 8.6 \text{ см}^3$, $\omega_2 = 0.7 \text{ г}$	1.36	212	1200	110.5
5	$W_0 = 17.2 \text{ см}^3$, $\omega = 22 \text{ г}$, $D = 1.35 \text{ см}$, $L_d = 0.65 \text{ м}$, $\omega_2 = 0.7 \text{ г}$, $q = 9.53 \text{ г}$	1.32	727	2057	209
6	2% ПВБ, 5.2% ПВБ, $q = 68 \text{ г}$, $\omega = 17.9 \text{ г}$, $W_0 = 15.9 \text{ см}^3$	1.16	317	902	418.2

Примечание: D и L_d – внутренний диаметр и длина ствола, соответственно

дымного пороха ДРП-3. Плотность заряжания составила 1.26 г/см³, вес метаемого тела был равен 26 г. Последующие опыты отличались от базового значениями одного или нескольких параметров, которые указаны во второй строке табл. 1.

Результаты моделирования суммированы в табл. 2. Здесь представлены значения максимального давления и дульной скорости, которые могут быть сопоставлены с экспериментальными характеристиками выстрела, приведенными в табл. 1. Кроме того, в табл. 2 содержатся также данные, характеризующие воспламенение и горение ВЗКГ, и показатели прогрессивности горения, включая $\Gamma_{\max}/\Gamma_{\min}$ – отношение максимальной и минимальной интенсивностей газообразования при горении заряда, Ψ_{PB} – долю сгоревшего пороха в точке максимума интенсивности газообразования и t_{PB} – время прогрессивного горения, т.е. время до момента достижения Γ_{\max} . На рис. 1, 2

расчетные диаграммы давление–время сопоставлены с экспериментальными диаграммами для нескольких опытов.

Для калибровки компьютерной программы был использован опыт № 1. Результаты расчета приведены в соответствующем столбце табл. 2 и на рис. 1. Приемлемое согласие расчета и эксперимента по дульной скорости, максимальному давлению и диаграмме давление–время в камере получено при входных параметрах задачи, имеющих естественный уровень величин.

Опыт № 2 отличается от опыта № 1 меньшей плотностью моноблока (1.23 г/см³ вместо 1.51). Соответственно, уменьшены вес моноблока и вес метаемого тела. При численном моделировании этого опыта мы полностью сохранили набор входных параметров, описывающих воспламенение и горение моноблока, который был использован при моделировании опыта № 1 (базовый на-

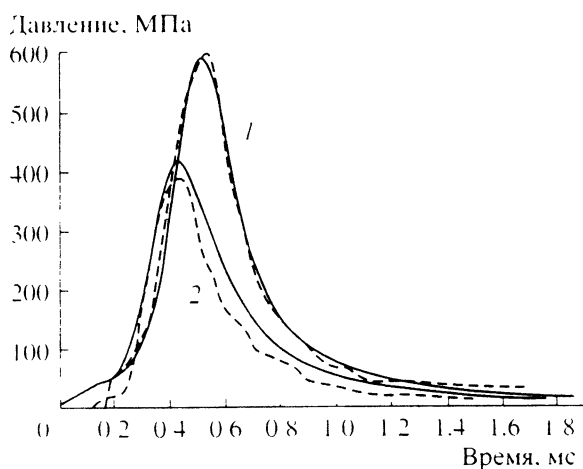


Рис. 1. Диаграммы давление–время. Сплошные линии – расчет, штриховые – эксперимент. 1 – опыт № 1, 2 – опыт № 2

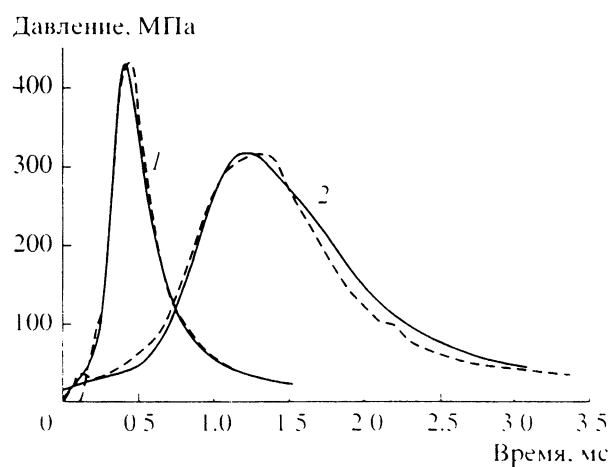


Рис. 2. Диаграммы давление–время. Сплошные линии – расчет, штриховые – эксперимент. 1 – опыт № 4, 2 – опыт № 6

Таблица 2 Результаты численного моделирования баллистических экспериментов

Опыт №	Варьируемые параметры	Максимальное давление, МПа	Дульная скорость, м/с	$\chi_1(\Psi_1)$	Полное время выстрела, мс	Задержка воспламенения моноблока, мс	Длительность конвективного горения, мс	Время горения моноблока, мс	Время прогрессивного горения, мс	Время охвата зерна горением, мс	W_{st}, W_{end} м/с (P_{st}, P_{end}) МПа	$\Gamma_{max}/\Gamma_{min}$	$\Psi_{гр}$
1	Базовый набор	591	1249	0.19 (1.0)	1.86	0.19	0.21	0.6	0.29	0.235	21–76 (51–330)	2.5	0.42
2	Базовый набор	418	1302	0.17 (1.0)	1.76	0.15	0.12	0.57	0.24	0.235	59–107 (43–110)	1.9	0.34
3	$a_1 = 135$	430	1589	0.43 (1.0)	1.53	0.15	0.17	0.74	0.27	0.215	28–91 (43–226)	2.1	0.41
4	$a_1 = 215,$ $a_2 = 0.53$	211	1202	1.0 (0.75)	1.12	0.17	0.2	>0.95	0.77	0.72	26–65 (52–189)	3.3	0.67
5	$a_1 = 215,$ $a_2 = 0.53$	727	2039	1.0 (0.995)	0.82	0.18	0.18	>0.64	0.21	0.72	21–96 (43–420)	3.8	0.23
6	$a_1 = 147,$ $a_2 = 0.2$	317	894	0.4 (1.0)	3.07	0.38	0.31	1.77	1.43	1.42	16–35 (38–91)	4.2	0.7

Примечание: χ_1 – безразмерный путь, пройденный метаемым телом по стволу к моменту завершения горения заряда Ψ_1 – доля пороха, сгоревшего к моменту вылета метаемого тела из ствола W_{st}, W_{end} – скорость конвективного горения в начале и конце горения моноблока (в скобках P_{st}, P_{end} – соответствующие давления)

бор) Результаты моделирования приведены в соответствующем столбце табл. 2 и на рис. 1. Из сравнения видно, что расчет хорошо воспроизводит форму диаграммы давления, хотя импульс давления и дульная скорость в эксперименте оказались несколько ниже, чем в расчете.

Опыт № 3 отличается от опыта № 1 лишь уменьшенным содержанием ингибитора (1.43% вместо 3%). Результаты моделирования приведены в третьем столбце табл. 2. При моделировании для получения наилучшего согласия с экспериментом мы изменили значения параметров, описывающих охват поверхности ингибированного зерна горением. Значения измененных параметров приведены во второй строке табл. 2 ($a_1 = 137$ вместо 70)

Опыты № 4 и № 5 отличаются от опыта № 1 главным образом меньшим весом метаемого тела и более короткой длиной ствола. В опыте № 5 вес заряда был вдвое больше, чем в опыте № 4. Результаты расчетов приведены в табл. 2. Для моделирования этих опытов был использован набор входных параметров, который отличается от базового значениями параметров охвата ($a_1 = 215$ вместо 70 и $a_2 = 0.53$ вместо 0.35). Из приведенных данных видно, что расчет хорошо воспроизводит форму диаграммы давления, дульную скорость и максимальное давление в обоих опытах. Из-за короткой длины ствола наблюдается неполное

сгорание моноблочного заряда, особенно значительное в опыте № 4.

В опыте № 6 в отличие от остальных опытов использовался более крупный порох марки ВТ (вместо ВУ) и содержание ингибитора было увеличено с 3 до 5.2%. Также был существенно увеличен вес метаемого тела. Для моделирования этого опыта был использован набор входных параметров, который отличается от базового значениями параметров охвата ($a_1 = 147$ вместо 70 и $a_2 = 0.2$ вместо 0.35).

В целом результаты тестирования демонстрируют возможность получения удовлетворительного согласия по параметрам выстрела и диаграмме давление–время во всех рассмотренных примерах. Характеристики горения моноблочного заряда, полученные в опытах № 1, № 4 и № 6 говорят о его высокой прогрессивности, которая приблизительно в равной мере обеспечивается за счет постепенности воспламенения заряда в режиме конвективного горения и постепенности охвата горением воспламенившегося порохового зерна. При прочих равных условиях прогрессивность горения тем выше, чем больше плотность имеет ВЗКГ и больше толщина пленки ингибитора на поверхности зерна (см. рис. 3).

Однако не удалось воспроизвести все опыты с единым набором входных параметров, описывающих свойства моноблока, и для получения согласия в некоторых опытах варьировались коэф-

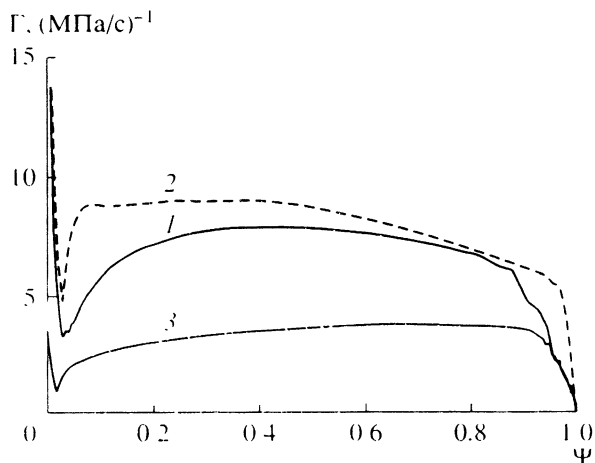


Рис. 3. Расчетные диаграммы интенсивность газообразования – доля сгоревшего пороха 1 – опыт № 1, 2 – опыт № 2, 3 – опыт № 6

фициенты, описывающие охват зерна горением. Тем не менее это еще не является свидетельством недостатков модели, поскольку в данном исследовании параметры баллистической установки и свойства заряда и покрытия изменялись в широком диапазоне, и контроль свойств заряда требует более точных методов. Необходимы дополнительные исследования, чтобы определить задержку воспламенения моноблока и уточнить закономерности, описывающие постепенный охват поверхности ингибированного зерна горением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена модель конвективного горения ВЗКГ в условиях выстрела. Разработана компьютерная программа расчета внутрибаллистических параметров. При разработке программы использована классическая модель выстрела, модифицированная с тем, чтобы учесть эффекты постепенного воспламенения ВЗКГ в режиме конвективного горения и охвата горением наружной поверхности зерен пороха, покрытых пленкой ингибитора.

Проведено тестирование программы с помощью экспериментов, выполненных в лабораторной ствольной установке при изменении в широком диапазоне параметров установки, веса и свойств ВЗКГ. Результаты тестирования демонстрируют возможность получения удовлетвори-

тельного согласия по параметрам выстрела и диаграмме давление–время во всех рассмотренных примерах. Анализ обнаружил высокую прогрессивность горения ВЗКГ, которая обеспечивается за счет постепенности воспламенения заряда в режиме конвективного горения и охвата горением воспламенившегося порохового зерна. Однако не удалось воспроизвести все опыты с единым набором входных параметров, описывающих свойства ВЗКГ, и для получения согласия в некоторых опытах варьировались коэффициенты, описывающие постепенный охват зерна горением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетические конденсированные системы. Краткий энциклопедический словарь / Под ред. акад. Жукова Б. П. М.: Янус-К, 1999. С. 232.
2. Серебряков М. Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. М.: Оборонгиз, 1962.
3. Дулей Дж. К., Кук Р. Л. Смесевой метательный заряд. Патент США 3938440 // Б.И. 1976. № 2. С. 12.
4. Ольсон Т. А., Скэнлон Дж. Дж. Прессованные заряды из бездымных порохов. Патент США 3679781 // Б.И. 1972. № 7. С. 73.
5. Сулимов А. А., Сукоян М. К., Михайлов Ю. М. и др. Метательный заряд. Патент № 2153144 РФ // Б.И. 2000. № 20. С. 25.
6. Королев В. П., Сулимов А. А., Михайлов Ю. М. // Пр. междунар. конф. по горению М.-С.-Пб., 1993. С. 22.
7. Хоменко Ю. П., Ищенко А. П., Касимов В. З. Математическое моделирование внутрибаллистических процессов в ствольных системах. Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения РАН, 1999. С. 254.
8. Романьков А. В., Сулимов А. А., Сукоян М. К. и др. Хим. физика 1992. Т. 11. № 7. С. 983.
9. Сулимов А. А., Ермолаев Б. С. // Хим. физика 1997. Т. 16. № 10. С. 51 (Ч. 1), С. 71 (Ч. 2).
10. Ермолаев Б. С., Сулимов А. А., Беляев А. А. и др. Хим. физика. 2001. Т. 20. № 1. С. 81.
11. Корнер Дж. Внутренняя баллистика орудий. М.: Изд-во иностр. лит., 1953.
12. Бетехтин С. А., Виницкий А. М., Горохов М. А. Газодинамические основы внутренней баллистики. М.: Оборонгиз, 1957. С. 384.
13. Ergun S. // Chem. Eng. Progr. 1952. V. 52. P. 89.
14. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б. и др. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980. С. 478.
15. Гольшитик М. А. Процессы переноса в зернистом слое. Новосибирск: Институт теплофизики СО АН СССР, 1984. С. 163.