

УДК 531.571; 531.576

## ДИНАМИКА ДВИЖЕНИЯ СНАРЯДА ПРИ НИЗКИХ ДАВЛЕНИЯХ В СТВОЛЕ

С. К. Чанкаев, В. Я. Яковлев

Открытое акционерное общество "Пиро-Росс", 141300 Сергиев Посад Московской области  
E-mail: piro-ross@tsinet.ru

Разработана математическая модель выстрела снаряда при низких давлениях в заснарядном пространстве. Рост давления ограничен из-за неодновременности воспламенения и сгорания частиц пороха и истечения продуктов сгорания пороха через зазор между снарядом и стенками ствола орудия. Определены кинетические характеристики процесса распространения пламени по частицам пороха. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных. Результаты расчетов использованы при проектировании самоходных пусковых установок 2А85 и модернизации самоходных пусковых установок 2А30.

Ключевые слова: пиротехника, внутренняя баллистика, артиллерийский снаряд.

Данная работа посвящена моделированию движения снаряда при выстреле из ствола в условиях низких давлений в заснарядном пространстве. В случае неодновременного воспламенения и горения пороховых частиц и истечения продуктов горения через зазор между снарядом и внутренней поверхностью ствола давление не превышает нескольких десятков атмосфер. Данная задача отличается от традиционной задачи о выстреле снаряда в артиллерийских орудиях. В орудиях, где плотность порохового заряда достаточно высока, создаются условия для мгновенного воспламенения пороховых частиц. При быстрорастущем давлении (до нескольких тысяч атмосфер) пороховые частицы сгорают в заснарядном пространстве до выхода снаряда из ствола. Тем не менее для анализа рассматриваемой задачи в настоящее время, как правило, используется традиционная постановка задачи о выстреле снаряда из артиллерийского орудия с введением коэффициентов, позволяющих согласовать получаемые результаты с экспериментальными данными. С целью получения физически обоснованных результатов рассматриваются постановка и решение задачи о выстреле снаряда из ствола с учетом процессов распространения пламени и горения частиц пороха при низких давлениях в заснарядном пространстве и истечении продуктов сгорания пороха через зазор между снарядом и внутренней стенкой ствола. Результаты данного исследования могут быть использованы при проектировании фейерверочных изделий и пусковых устройств для них.

**1. Формулировка задачи.** Для теоретического исследования процессов, происходящих при артиллерийском выстреле из орудий, используются традиционные модели. Одна из таких моделей, описывающая эти процессы в термодинамическом приближении, представлена в [1]. В соответствии с моделью кинематические характеристики снаряда находятся из решения следующей системы уравнений, включающей основное уравнение пиродинамики, закон горения заряда, закон газообразования и уравнение движения снаряда соответственно:

$$\begin{aligned}
 PS(l_\psi + x) &= fm\psi - \frac{k-1}{2} \varphi MV^2, & \frac{de}{dt} &= a_1 P, \\
 \psi &= \chi z + \lambda z^2, & \varphi M \frac{dV}{dt} &= PS.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Здесь  $x$  — расстояние, на которое перемещается снаряд;  $V$  — скорость снаряда;  $P$  — давление пороховых газов в заснарядном пространстве;  $de/dt$  — скорость горения пороха;  $S$  — площадь поперечного сечения ствола;  $M$  — масса снаряда;  $m$  — масса заряда;  $l_\psi = (1/S)(W - (1 - \psi)m/\rho - \alpha m\psi)$  — свободная приведенная длина заснарядного пространства;  $\psi$  — доля пороха, превратившегося в газ;  $m\psi$  — масса газов;  $\alpha$  — коволюм;  $\rho$  — плотность пороха;  $W$  — свободный объем под снарядом в начальный момент времени;  $f$  — сила пороха;  $k = c_p/c_v$ ;  $c_p, c_v$  — удельные теплоемкости при постоянных давлении и объеме соответственно;  $a_1$  — скорость горения пороха при  $P = 1$  атм;  $\varphi = 1,05 \div 1,10$  — коэффициент, учитывающий влияние сторонних сил;  $z = e/e_0$  — относительная толщина слоя пороха;  $e, e_0$  — текущая и начальная толщина слоя пороха;  $\chi, \lambda$  — коэффициенты, характеризующие форму частиц пороха.

Адекватность предложенной модели доказана в [1] путем сравнения расчетных значений скорости при выходе снаряда из ствола и максимального давления пороховых газов в стволе с соответствующими значениями, полученными экспериментально. Применительно к рассматриваемой задаче (при низких давлениях в заснарядном пространстве) в системе уравнений (1) используется дополнительный коэффициент  $\phi$ , с помощью которого учитываются неодновременность воспламенения частиц пороха и расход продуктов сгорания через зазор между корпусом снаряда и внутренней стенкой ствола. При этом коэффициент, учитывающий влияние сторонних сил, равен  $\varphi = \phi(1,05 \div 1,10)$ . Значение  $\phi$  в каждом случае определяется по результатам сравнения экспериментальных и расчетных значений давления в стволе. Если в середине временного интервала результаты расчета и эксперимента удовлетворительно согласуются, то в начальные моменты времени расчетные значения значительно превышают данные, полученные в эксперименте. Использование таких оценок приводит, в частности, к существенному увеличению массы пусковых установок и не позволяет определить массу вышибающего заряда (ВЗ) снаряда, необходимую для достижения высоты срабатывания изделия. Подобные оценки не учитывают процесс распространения пламени по частицам пороха ВЗ при относительно небольших давлениях в пространстве за снарядом и истечение продуктов горения через зазор между снарядом и внутренней стенкой ствола.

Данная работа посвящена анализу процессов, протекающих при выстреле снарядов в сформулированных выше условиях.

**2. Анализ полидисперсного режима сгорания пороха.** Рассматривается ствол, представляющий собой металлическую трубу с приваренным дном. В ствол вставляется снаряд с присоединенным к нему стаканом, в котором находится ВЗ в виде мешочка с порохом (рис. 1). После срабатывания воспламенительного устройства, воспламенения и сгорания некоторой доли частиц пороха при достижении внутри стакана давления разрушения процесс горения происходит в объеме под снарядом. В результате действия давления продуктов сгорания ВЗ снаряд движется в стволе мортиры. После выхода из ствола движение снаряда происходит по инерции.

Параметры задачи определяются в объеме, ограниченном внутренней поверхностью ствола, нижней поверхностью снаряда и поверхностью, перпендикулярной оси ствола, с минимальным зазором между снарядом и стволом (критическое сечение) (рис. 1). Навеска пороха, находящаяся в стакане ВЗ, инициируется одним или двумя электровоспламенителями. В начальный момент времени воспламеняется некоторая часть порохового заряда. С течением времени пламя распространяется по всему пороховому заряду, вовлекая новые частицы пороха в процесс горения. Образуются газообразные и конденсированные продукты сгорания пороха. Массовая доля конденсированных продуктов сгорания значительна:  $\varepsilon = 0,56$ , что должно учитываться при анализе. Размер частицы конденсированной фазы полагается таким, что температуру и скорость газовой и конденсированной фаз можно

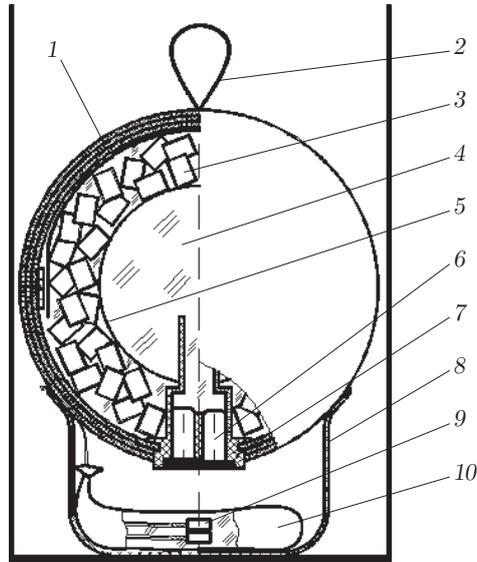


Рис. 1. Схема заряда:

1 — корпус снаряда; 2 — петля; 3 — пирозлементы; 4 — воспламенительно-разрывной заряд; 5 — корпус воспламенительно-разрывного заряда; 6 — замедлитель; 7 — трубка; 8 — стакан вышибающего заряда; 9 — электровоспламенитель; 10 — вышибающий заряд

считать одинаковыми. Параметры изложенной модели определяются из решения следующей системы уравнений, состоящей из уравнения сохранения массы, уравнения сохранения энергии, уравнения движения снаряда и уравнения состояния соответственно:

$$\begin{aligned} \frac{dm_{pr}}{dt} &= \dot{\psi} - G, & \frac{d(m_{pr}u)}{dt} &= -P \frac{dv}{dt} + \dot{\psi}u_0 - Gu, \\ M \frac{dV}{dt} &= PS_u, & P &= (1 - \varepsilon) \frac{m_{pr}}{v} R \frac{u}{c_{vg}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $m_{pr}$  — масса продуктов сгорания пороха;  $\varepsilon$  — доля конденсированной фазы в продуктах сгорания пороха;  $\dot{\psi}$  — скорость образования продуктов сгорания пороха;  $G$  — массовый расход продуктов сгорания пороха через критическое сечение;  $u$  — внутренняя энергия на единицу массы продуктов сгорания;  $u_0 = c_v T_b$ ;  $T_b$  — температура горения пороха;  $v = W - m_*/\rho + Sx$  — объем, занимаемый продуктами сгорания пороха;  $m_*$  — масса несгоревшего пороха;  $S_u$  — площадь поперечного сечения снаряда;  $R$  — газовая постоянная газовой фазы продуктов сгорания;  $c_{vg}$  — удельная теплоемкость газовой фазы продуктов сгорания при постоянном объеме.

Для определения величины  $\dot{\psi}$  делается ряд допущений. Предполагается, что частицы пороха имеют сферическую форму. Диаметр частиц  $2r = 1$  мм. После срабатывания инициаторов горения воспламеняется некоторая доля  $N_0$  частиц пороха. От горящего пороха пламя распространяется на остальные частицы. Полагается, что горящие и негорящие частицы пороха равномерно распределены в заснарядном пространстве и объем, занимаемый частицами, мал по сравнению с объемом, в котором происходит горение пороха. Закономерность распространения пламени по частицам представляется в виде

$$\frac{dN}{dt} = \alpha_1 N \left( \frac{P}{P_0} \right)^{\alpha_2}, \quad (3)$$

т. е. количество воспламеняющихся частиц пропорционально количеству горящих частиц в единице объема и давлению продуктов сгорания. Здесь  $\alpha_i$  — константы, определяемые из

эксперимента. В начальный момент все частицы имеют один и тот же размер. Смесь монодисперсная. В процессе распространения пламени одни частицы воспламеняются, горение других прекращается, поэтому для рассмотрения процесса горения пороховых частиц необходимо использовать модель полидисперсной среды. Уравнение (3) определяет закономерность образования фракций горящих частиц пороха. Для различных фракций пороха вводится функция  $\delta_i$ :  $\delta_i = 1$ , если фракция горит,  $\delta_i = 0$ , если горение еще не началось или уже закончилось. Количество воспламеняющихся частиц  $i$ -й фракции определяется интегрированием уравнения (3):

$$N_i = \alpha_1 \int_{t_i}^{t_{i+1}} \left( \sum_{j=0}^{i-1} (\delta_j N_j) \right) \left( \frac{P}{P_0} \right)^{\alpha_2} dt. \quad (4)$$

Здесь  $i = 1, \dots, J_k$ ;  $t_i = i\Delta$ ;  $t_k = J_k\Delta$  — время окончания процесса;  $\Delta$  — параметр дискретизации процесса. Выражение (4) справедливо, если  $\sum_{j=0}^{i-1} N_j$  меньше или равно начальному количеству частиц, в противном случае  $N_i = 0$ . Следуя [2], будем считать, что унитарные топлива, к которым относятся порох и взрывчатые вещества, содержат не только собственно топливо, но и перемешанный с ним на молекулярном уровне окислитель, т. е. представляют собой конденсированную твердую гомогенную смесь топлива и окислителя. Линейная скорость горения пороха и других видов унитарного топлива зависит от давления. Соответствующая эмпирическая зависимость имеет вид [3]

$$\frac{dr_i}{dt} = -b_1 \left( \frac{P}{P_0} \right)^{b_2}, \quad (5)$$

где  $b_1, b_2$  — эмпирические константы. Для рассматриваемого пороха  $b_1 = 12,1$  мм/с,  $b_2 = 0,24$  при  $P < 60$  МПа. При сгорании частиц  $i$ -й фракции значение  $r_i$  становится равным нулю. В тот же момент времени становится равной нулю и функция  $\delta_i$ . Для функции  $\psi$  можно записать следующее выражение:

$$\dot{\psi} = 4\pi\rho \sum_i \delta_i N_i r_i^2 \left| \frac{dr_i}{dt} \right| \quad (6)$$

(суммирование проводится по всем фракциям).

Функция  $G$  определяется из решения задачи об истечении продуктов сгорания из сверхзвукового сопла [4]. Аналогичная задача рассмотрена в [5]. Расход газа через критическое сечение определяется из соотношения

$$G = \frac{PF_*}{\sqrt{T}} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{(k+1)/(2(k-1))} \left( \frac{k}{R} \right)^{1/2}. \quad (7)$$

Здесь  $F_*$  — площадь критического сечения;  $T$  — температура газа в заснарядном пространстве. Для смеси продуктов сгорания пороха  $k \approx 1,1$ . Из [4] следует, что сверхзвуковое течение продуктов сгорания пороха начинается при  $P > 1,63P_0$ . В реальных условиях выстрела это значение достигается практически мгновенно.

Система уравнений (2)–(7) позволяет решить поставленную задачу.

**3. Использование разработанного метода решения.** Рассматриваемая постановка задачи использовалась при изучении процессов, происходящих при выстреле фейерверочного изделия из ствола мортиры, и выборе параметров конструкции изделия.

Выпускаемые в Российской Федерации высотные фейерверочные изделия делятся на две группы: 1) изделия калибров 195 и 310 мм, действующие на высоте от 250 до 500 м и

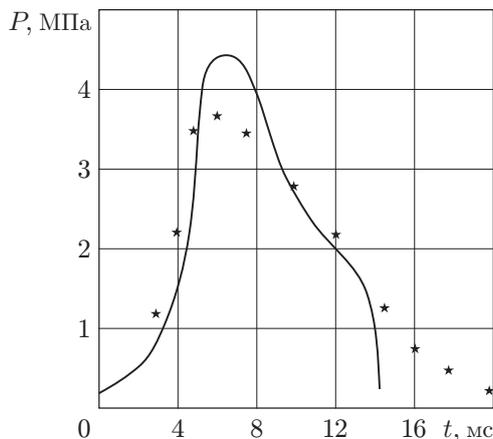


Рис. 2. Давление в донной части ствола:  
линия — результаты расчета; точки — экспериментальные данные

создающие в небе большие фигуры из пироэлементов различных типоразмеров; 2) изделия калибров 60 и 105 мм с высотой срабатывания до 150 м, которые из-за небольших габаритов могут снаряжаться пироэлементами только одного типоразмера. Для повышения зрелищности фейерверочных показов необходимы изделия, действующие на высоте от 150 до 250 м и формирующие фигуры большого объема. Актуальность разработки изделия калибра 125 мм обуславливается также тем, что мортиры данного калибра можно размещать на существующих пусковых установках 2А30 без какого-либо изменения конструкции их оснований. Перед проектированием изделия проводились расчетные исследования. На начальном этапе были определены константы, входящие в систему уравнений (4). Экспериментально наиболее подробно изучено изделие калибра 310 мм, поскольку в нем содержится максимальный пороховой заряд и оно представляет интерес с точки зрения безопасности показов. Константы  $N_0$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  определялись градиентным методом из решения уравнений (2)–(7) с использованием результатов эксперимента с изделиями калибра 310 мм. На рис. 2 представлены результаты измерения давления продуктов сгорания в донной части ствола для изделий этого типа. Из решения задачи следует, что в начальный момент времени от электровоспламенителей загорается порох массой  $\approx 68$  г. При этом  $\alpha_1 = 22$ ,  $\alpha_2 = 1,95$ . Анализ результатов расчетов, проведенных для изделий калибра 125 мм, показывает, что кинетические константы сохраняют свои значения, в то время как масса воспламенившегося в начальный момент пороха зависит от калибра изделия, в частности, для изделия калибра 125 мм она равна 35 г. Кинетика процесса воспламенения и горения частиц пороха такова, что в процессе выстрела изделия калибра 310 мм сгорает  $\approx 90$  % вышибающего заряда. Оставшиеся горящие частицы пороха и его продукты сгорания вылетают из трубы мортиры в атмосферу вслед за изделием, создавая горящее дымное облако.

**Заключение.** Разработана модель выстрела снаряда из ствола при низких давлениях в заснарядном пространстве при одновременном воспламенении и горении пороховых частиц и истечении продуктов сгорания пороха через зазор между снарядом и внутренней стенкой ствола. Результаты расчетов показали применимость модели для широкого класса снарядов, используемых в пиротехнике. В частности, проведенные исследования позволили сделать вывод, что для срабатывания изделия калибра 125 мм на высоте 150 ÷ 250 м достаточно применить в конструкции изделия вышибающий заряд с массой пороха 72 г. Результаты эксперимента подтвердили правильность выбора массы пороха для вышибающего заряда изделия калибра 125 мм, разработанного в ОАО «Пиро-Росс». Использование такого изделия дает возможность создавать наиболее красочные и разнообразные фейер-

верочные картины в ночном небе с применением самоходных пусковых установок 2А30 и 2А85, существенно не увеличивая при этом размеры опасных зон и не меняя основания установок 2А30. Это позволяет не только производить новые фейерверочные комплексы, но и приступить к модернизации имеющихся установок.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Серебряков М. Е.** Внутренняя баллистика. М.: Оборонгиз, 1949.
2. **Нигматулин Р. И.** Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. Т. 1.
3. **Зельдович Я. Б.** Математическая теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович, Г. М. Махвиладзе. М.: Наука, 1980.
4. **Абрамович Г. Н.** Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1976.
5. **Weinman L.** Choked flow, a frequently misunderstood term // J. Pyrotech. 2005. Iss. 21. P. 31–35.

*Поступила в редакцию 20/XII 2006 г.*

---