

КОНВЕКТИВНОЕ ГОРЕНИЕ И ВНУТРЕННЯЯ БАЛЛИСТИКА МОНОБЛОЧНЫХ ЗАРЯДОВ ИЗ КРУПНЫХ ЗЕРЕН ПОРОХА, ИНГИБИРОВАННЫХ ПОЛИВИНИЛБУТИРАЛЕМ

Б. С. Ермолаев¹, А. А. Сулимов¹, А. В. Романьков¹,
М. К. Сукоян¹, А. А. Беляев¹, И. П. Башилов²

¹ИХФ РАН

г. Москва, Россия

²ИФЗ РАН

г. Москва, Россия

Работа посвящена изучению горения так называемого высокоплотного заряда конвективного горения (ВЗКГ) — новой разновидности прогрессивно-горящего метательного заряда повышенной плотности. Высокоплотные заряды конвективного горения изготавливают в виде одной или нескольких шашек нужной конфигурации путем прессования из пороховых гранул, покрытых с наружной поверхности тонкой пленкой полимерного материала. Такие заряды были предложены проф. А. А. Сулимовым в начале 1980-х гг. на основе исследований стабилизации конвективного горения, которые были выполнены к тому времени в ИХФ РАН, а затем интенсивно продолжались в кооперации с ЦНИИТОЧМАШ и ИПХФ РАН, главным образом, применительно к унитарным патронам стрелкового оружия [1–3]. Сейчас в ИХФ РАН эти исследования продолжаются, но уже без кооперации, с целью добиться более полного понимания закономерностей воспламенения и горения ВЗКГ и научиться их моделировать.

Исследование, представленное в данном сообщении, состоит из трех частей.

Эксперименты по горению моноблочных зарядов из крупных, одно- или семиканальных пороховых зерен. Ранее исследовались ВЗКГ, изготовленные, главным образом, из тонко-

сводных бесканальных или одноканальных зерен. Поэтому важно было развеять сомнения, что при увеличении размера зерен и, в частности, при использовании 7-канальных зерен, которые в традиционном заряде сами горят прогрессивно, преимущества моноблочного заряда сохраняются и обеспечивают достаточный прирост дульной скорости.

Для исследования были выбраны пироксилиновые пороха марок 5/1 и 5/7 с толщиной горящего свода около 0,6 мм при наружном диаметре зерна 1,4 и 3,3 мм и длине зерна 2,9 и 4,7 мм соответственно. Для создания ингибирующего покрытия использовали поливинилбутираль (ПВБ). Опыты проводили в бомбе с дожигательной секцией и в 23-миллиметровой лабораторной ствольной установке. Моноблоки диаметром 20 или 28 мм и длиной до 120 мм запрессовывали порционно прямо в зарядную камеру. Процесс горения регистрировали с помощью набора пьезоэлектрических датчиков. В бомбе четыре датчика размещались вдоль заряда с расстоянием около 20 мм между датчиками. Еще один датчик регистрировал давление в дожигательной камере, где размещался вос-

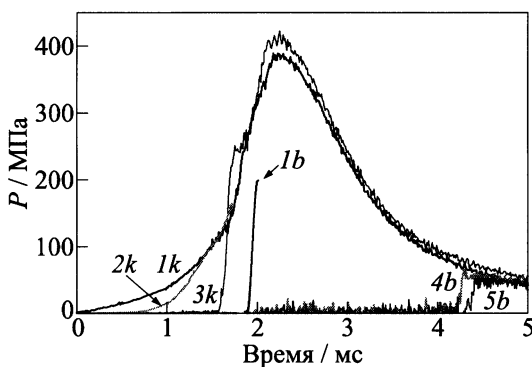


Рис. 1 Записи сигналов 6 датчиков давления, размещенных в камере (1k, 2k и 3k, расстояние от торца заряда 5, 55 и 105 мм) и вдоль ствола (1b, 4b и 5b, расстояние от входа в ствол 75, 1850 и 2060 мм) в 23-миллиметровой лабораторной ствольной установке. Опыт G4 с ВЗКГ из зерен пороха 5/7 + 4% ПВБ, $\rho_0 = 1,2 \text{ г/см}^3$. Стрелками указан момент обрыва записи

пламенитель. В ствольной установке воспламенитель размещался между ВЗКГ и метаемым телом. Три датчика, расположенные по длине зарядной камеры с расстоянием 50 мм между датчиками, давали информацию о стадии конвективного горения моноблока, а датчики, размещенные вдоль ствола (от 3 до 5), служили отметчиками времени движения метаемого тела. Пример регистрации приведен на рис. 1.

В опытах варьировали количество ПВБ (до 8%(вес.)), плотность моноблока (в диапазоне 1,20–1,45 г/см³) и мощность воспламенителя. Различные условия горения, реализуемые в бомбе и ствольной установке, дали возможность оценить влияние темпа роста давления. Результаты исследования показали, что ВЗКГ из крупно-зерненных семиканальных порохов демонстрируют, в целом, те же самые свойства, которые мы наблюдали ранее на зарядах, изготовленных из тонко-сводных пороховых зерен бесканальной или одноканальной формы. Подбирая свойства моноблока, мы получили скорости конвективного горения в интервале от 20 до 100 м/с, желательном для метательного заряда. Наблюдаемый прирост дульной скорости при равном максимальном давлении по сравнению с зарядом из штатного семиканального пороха насыпной плотности превысил 12%.

Численное моделирование. В нашем распоряжении имеются две компьютерные программы, разработанные ранее применительно к горению ВЗКГ: одномерная газодинамическая программа [4] — для анализа распространения конвективного горения вдоль заряда, а упрощенная баллистическая программа [5] — для расчета характеристик выстрела. В обеих программах для описания воспламенения и постепенного охвата горением поверхности пороховых зерен, покрытых пленкой ингибитора — наименее изученной фазы исследуемого процесса — использована полуэмпирическая модель, основные положения которой были развиты по результатам баллистического анализа экспериментальных данных, полученных на ВЗКГ из тонко-сводного пироксилинового пороха в 14,5-миллиметровой ствольной установке. Одной из задач данного исследования было проверить и уточнить значения входных коэффициентов этой модели, сопоставляя расчеты с экспериментом на ВЗКГ из крупных пороховых зерен. Соответствующие примеры даны на рис. 2 и 3.

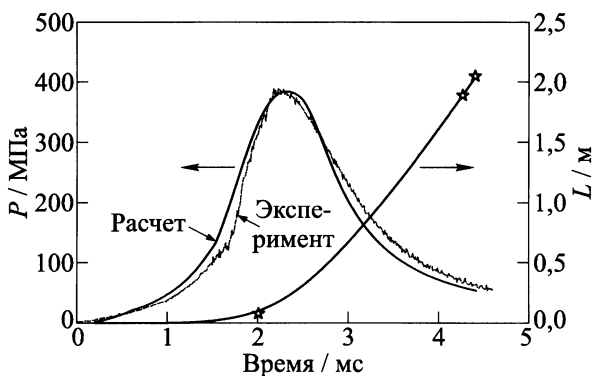


Рис. 2 Сравнение расчета с экспериментом по диаграмме давление–время в камере и траектории движения метаемого тела по стволу. Опыт G4, максимальное давление 384 МПа, дульная скорость 1075 м/с

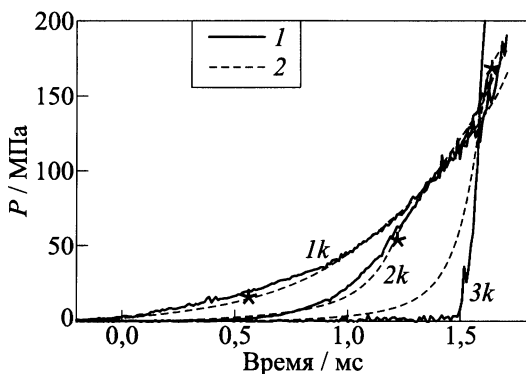


Рис. 3 Сравнение экспериментальных (1) и расчетных (2) диаграмм давление–время для трех датчиков, размещенных вдоль камеры с расстоянием 50 мм, в опыте G4. Звездочкой отмечено положение фронта пламени

В целом, исследование показало, что с помощью численного моделирования можно с достаточной точностью воспроизвести особенности конвективного горения и баллистические характеристики, наблюдаемые в эксперименте. Нами проведен анализ входных параметров задачи, которые позволили достичь наилучшего согласия.

Моноблочные заряды, изготовленные из крупных пороховых зерен, обладают высокой газопроницаемостью. Можно было ожидать, что это вызовет замедление распространения фронта конвективного горения по мере его приближения к закрытому торцу заряда из-за заполнения пор перед фронтом охлажденными продуктами горения пороха и разложения ингибитора. Численное моделирование показало, что этот эффект действительно наблюдается в условиях бомбы с дожигательной секцией, когда давление на внешней границе заряда растет с темпом, не превышающим 10–20 МПа/мс. Однако в условиях ствольной установки, когда давление растет с гораздо более высоким темпом порядка 100 МПа/мс, замедление фронта пламени отсутствует.

Нетрадиционная схема выстрела с присоединенным зарядом. Изложенные выше результаты баллистического исследования соответствовали традиционной схеме выстрела, когда метательный заряд целиком располагался в зарядной камере. Теоретические исследования предсказывают [6], что схема с присоединенным зарядом, при которой метательный заряд разделяется на две части: одна часть заряда сгорает в камере ствольной установки, а другая часть, присоединенная к метаемому телу, движется вместе с ним по стволу, сгорая в процессе движения, — позволяет значительно повысить дульную скорость. Эта схема с использованием блочного заряда была реализована в 23-миллиметровой лабораторной ствольной установке. Обе части заряда изготавливались в виде цилиндрических блоков плотностью около $1,4 \text{ г/см}^3$ из зерен пироксилинового одноканального пороха ВТМ (наружный диаметр зерна 0,9 мм, длина 3,2 мм) с добавкой 4% ПВБ. Присоединенный заряд по боковой поверхности покрывался 1,5-миллиметровым слоем парафина, прикреплялся сзади к метаемому телу и воспламенялся с открытого торца при срабатывании воспламенителя, размещенного в полости между присоединенным и основным зарядом. В опытах варьировали массу присоединенного заряда от 10 до 40 г при суммарной массе метательного заряда 60–70 г. При выстреле с присоединенным зарядом для метаемого тела массой 35 г достигнута скорость 2160 м/с, что почти на 15% выше, чем в случае, когда весь заряд размещался в камере.

Таким образом, проведенное исследование показало, что:

- потенциальные возможности ВЗКГ сохраняются в широком диапазоне размеров порохового зерна: даже 7-канальное зерно, которое само по себе обладает высокой прогрессивностью горения, может быть использовано для изготовления ВЗКГ и дать прирост дульной скорости по сравнению с зарядом насыпной плотности;
- результаты численного моделирования конвективного горения и баллистических характеристик выстрела с ВЗКГ из крупных зерен хорошо согласуются с результатами измерений. После некоторых улучшений модели численное моделирование может быть использовано для предсказания характеристик горения в устройствах различного типа с ВЗКГ;
- применение ВЗКГ в нетрадиционной схеме выстрела с присоединенным зарядом дает дополнительный прирост дульной скорости на уровне 15%.

Литература

1. Сулимов А. А., Ермолаев Б. С. Квазистационарное конвективное горение в энергетических материалах с низкой пористостью // Химическая физика, 1997. Т. 16. № 9. С. 51–72.
2. Сулимов А. А., Королёв В. П., Михайлов Ю. М. и др. Метательный заряд // Патент РФ на изобретение № 2153144 от 20.07.2000.
3. Сулимов А. А., Ермолаев Б. С., Королёв В. П. и др. Исследования конвективного горения и внутрибаллистического процесса высокоплотных пороховых зарядов в ствольных установках // Материалы 2-й Всероссийской конференции «Энергетические конденсированные системы». — Черноголовка, 2004. С. 226–228.
4. Ермолаев Б. С., Сулимов А. А., Беляев А. А., Романьков А. В., Посьянский В. С. Моделирование конвективного горения ингибированных энергетических материалов // Химическая физика, 2001. Т. 20, № 1. С. 84–93.
5. Ермолаев Б. С., Сулимов А. А., Романьков А. В. Численное моделирование баллистического эксперимента с высокоплотным зарядом конвективного горения // Химическая физика, 2002. Т. 21. № 7. С. 79–87.
6. Хоменко Ю. П., Ищенко А. Н., Касимов В. З. Математическое моделирование внутрибаллистических процессов в ствольных системах. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999.