

## ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 662.612

### КОНВЕКТИВНОЕ ГОРЕНИЕ БЛОЧНЫХ ЗАРЯДОВ ИЗ СЕМИКАНАЛЬНЫХ ПОРОХОВЫХ ЗЕРЕН, ИНГИБИРОВАННЫХ ПОЛИВИНИЛБУТИРАЛЕМ

© 2015 г. Б. С. Ермолаев<sup>1\*</sup>, А. А. Сулимов<sup>1</sup>, А. В. Романьков<sup>1</sup>,  
В. Е. Храповский<sup>1</sup>, А. А. Беляев<sup>1</sup>, А. Б. Кроули<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, Москва

<sup>2</sup>Кранфильдский университет, Шривенхэм, Великобритания

\*E-mail: bse@chph.ras.ru

Поступила в редакцию 16.04.2014

Изучено горение блочных зарядов, изготавливаемых из семиканальных пороховых зерен, ингибированных поливинилбутиралем. Опыты проводили в манометрической бомбе, сопловой бомбе с дожигательной камерой и 23-миллиметровой лабораторной ствольной установке, что обеспечивало широкий спектр условий горения. Процесс горения и движение снаряда по стволу регистрировали с помощью набора пьезоэлектрических датчиков. В опытах варьировали количество ингибитора, плотность моноблока ( $1.2\text{--}1.45\text{ г/см}^3$ ) и мощность воспламенителя. Различные условия горения, реализуемые в бомбе и ствольной установке, дали возможность оценить влияние темпа роста давления на скорость конвективного горения блочного заряда. Подбирая свойства последнего, мы получили значения скорости конвективного горения в интервале от 10 до 60 м/с, который представляется оптимальным для использования блочного заряда при выстреле. Результаты исследования показывают, что крупные семиканальные пороховые зерна, несмотря на собственную высокую прогрессивность горения, при использовании их в блочных зарядах способны давать столь же высокий эффект, как и ранее изученные марки пороха с мелкими зёрнами. Наблюдаемый прирост дульной скорости блочного заряда по сравнению с зарядом из штатного семиканального пороха насыпной плотности при равном максимальном давлении превысил 12%. С помощью численного моделирования проведен анализ опытных данных и дано объяснение наблюдаемому в опытах влиянию темпа роста давления на скорость конвективного горения блочных зарядов.

*Ключевые слова:* конвективное горение, блочные заряды, манометрическая бомба, ствольная установка.

DOI: 10.7868/S0207401X15050040

#### ВВЕДЕНИЕ

В начале 80-х годов проф. А.А. Сулимов, опираясь на результаты исследований по стабилизации конвективного горения, которые к тому времени были выполнены в ИХФ РАН (обзор этих работ можно найти в [1]), предложил концепцию нового метательного заряда повышенной плотности. Заряд, получивший название “высокоплотный заряд конвективного горения” (ВЗКГ), имеет блочную конструкцию и изготавливается в виде одной или нескольких шашек нужной конфигурации путем прессования из пороховых гранул, покрытых с наружной поверхности тонкой пленкой полимерного материала толщиной в несколько микрон. Последующие исследования показали [2, 3], что применительно к ствольным системам ВЗКГ способен дать заметный прирост дульной скорости по сравнению с классическим зарядом при одинаковом

максимальном давлении. Это достигается благодаря сочетанию повышенной плотности заряда с высокой прогрессивностью горения заряда. Прогрессивность горения ВЗКГ определяется двумя факторами [1, 4, 5]. Во-первых, процесс воспламенения порохового заряда протекает медленнее и длится дольше, чем при классической схеме; воспламенение заряда по всей длине завершается, когда давление в камере, достигнув максимума, начинает снижаться. Все это время поверхность порохового заряда, охваченная горением, увеличивается. Во-вторых, в момент начала горения каждого зерна большая часть его наружной поверхности все еще остается закрытой пленкой полимерного материала, и охват горением всей поверхности зерна занимает время, которое тем больше, чем толще пленка и меньше в ней дефектов.

В целом горение ВЗКГ при выстреле имеет кардинальные отличия от горения зарядов привычной классической конфигурации, при которой наилучшие результаты достигаются как раз, когда пороховой заряд оказывается полностью охваченным горением уже на начальной стадии выстрела при сравнительно низких давлениях. Применительно к ВЗКГ обе стадии процесса — распространение горения на весь объем блочного заряда и постепенный охват наружной поверхности зерен горением играют ключевую роль, определяя высокую прогрессивность горения. Поэтому знание закономерностей воспламенения и горения блочного заряда, умение подбирать нужные характеристики становятся важными условиями успеха. Фактически схема заряда с ВЗКГ является одним из примеров, когда во внутреннюю баллистику вводится концепция “управляемого горения”.

Методика получения данных по воспламенению и горению ВЗКГ была предложена и опробована ранее в работах [1, 4, 5]. Эти исследования проводились главным образом на зарядах, изготовленных из тонкосводных бесканальных или одноканальных зерен, применительно к унитарным патронам стрелкового оружия. В данной работе исследуется конвективное горение блочных зарядов, изготовленных из крупных пороховых зерен, которые сами горят с высокой прогрессивностью. Такие заряды могут представлять интерес для метательных устройств большого калибра. Одна из целей данной статьи — показать, что основные свойства ВЗКГ, изученные на зарядах из мелких пороховых зерен, сохраняются независимо от размера зерна и числа каналов, открывая возможность повышения баллистических характеристик выстрела.

Опыты проводились в манометрической бомбе, в сопловой бомбе с дожигательной камерой и 23-миллиметровой лабораторной гладкоствольной установке. Манометрическая бомба традиционно применяется для получения первичной информации о горении пороха. Сопловая бомба используется для изучения конвективного горения, когда давление в камере сохраняется почти постоянным или слабо возрастает, пока волна конвективного горения распространяется вдоль заряда. Наконец, ствольная установка позволяет определить скорости конвективного горения при быстро нарастающем давлении и оценить баллистические свойства исследуемого заряда.

Для регистрации использовали пьезокварцевые датчики давления; в сопловой бомбе и ствольной установке датчики размещались в нескольких точках вдоль камер и по длине ствола. Моноблоки диаметром 19 мм (для сопловой бомбы) или 28 мм (для ствольной установки) и длиной до 120 мм запрессовывали порционно непо-

средственно в зарядную камеру. Результаты опытов сопоставлены с теоретическими расчетами, проведенными с помощью ранее разработанной компьютерной программы конвективного горения блочных пороховых зарядов [4].

Исследование проведено на пироксилиновом порохе марки 5/7 с полутолщиной горящего свода в 0.33 мм при наружном диаметре зерна 3.3 мм и длине зерна 4.7 мм. Внешняя поверхность зерен  $S_0$  равна  $10.5 \text{ см}^2/\text{г}$ , полная поверхность, включая каналы, равна  $13.8 \text{ г}/\text{см}^3$ , эффективный диаметр зерен  $d_0$ , определенный по величине  $S_0$ , равен 3.6 мм. Чтобы создать на наружной поверхности зерен пленку ингибирующего покрытия, использовали поливинилбутираль (ПВБ). Ранее это вещество хорошо показало себя на ВЗКГ из тонкосводных порохов [2, 3]. Поливинилбутираль — полимерный материал белого цвета плотностью  $1.1 \text{ г}/\text{см}^3$ , температура размягчения —  $65^\circ\text{C}$ . Опыты по термическому разложению ПВБ, проведенные на дериватографе Netzsch STA 409P в потоке аргона при скорости нагрева 10 град/мин, показали, что интенсивное разложение ПВБ начинается при температуре  $\sim 300^\circ\text{C}$  и проходит в две последовательные стадии. Суммарный эндотермический эффект разложения равен 380 Дж/г. Покрытие наносили на зерна пороха из 5%-ного спиртового раствора при непрерывном перемешивании. Затем зерна сушили на открытом воздухе, в сушильном шкафу при температуре  $60^\circ\text{C}$  и снова на воздухе до полного удаления спирта. Процент покрытия определяли при взвешивании. Зерна засыпали порционно в зарядную камеру установки и прессовали, задавая давление прессования и время выдержки.

## ОПЫТЫ В МАНОМЕТРИЧЕСКОЙ БОМБЕ

Опыты проводили в манометрической бомбе стандартной формы номинальным объемом  $90 \text{ см}^3$  на образцах насыпной плотности ( $0.8\text{--}0.83 \text{ г}/\text{см}^3$ ). Цель опытов — изучить влияние содержания ПВБ в образцах на скорость горения. Образцы пороха массой 5.1 г засыпали в стаканчик из плексигласа внутренним диаметром 19 мм и длиной 56 мм. Стаканчик с образцом помещали в бомбу. Горение инициировали навеской пироксилиновой ваты, сгорание которой создавало в бомбе начальное давление, равное  $\approx 45 \text{ МПа}$ , за время 2–3 мс. Результаты опытов на порохе марки 5/7 с различным содержанием ингибитора в виде диаграмм давление—время показаны на рис. 1. Можно выделить три характерных участка: начальный участок роста давления, вызванный сгоранием воспламенителя; основной участок, связанный с воспламенением и горением исследуемого заряда; и участок спада давления (после прохождения точки максимума), связанный с охлаждением продуктов горения. При увеличении содержания

ингибитора темп роста давления на начальной фазе основного участка заметно снижается. Некоторая разница в величине максимального давления не связана с обсуждаемым эффектом и объясняется тем, что реальный свободный объем бомбы несколько изменялся от опыта к опыту из-за используемых технических вставок.

Дифференцируя диаграмму давления на основном участке и применяя стандартные формулы пиростатики [6], можно получить связь интенсивности газообразования  $\Gamma = (1/P)(d\psi/dt)$  с долей  $\psi$  сгоревшего пороха:

$$\Psi = \frac{\pi}{\pi(1 - K) + K}, \quad (1)$$

$$\Gamma = \frac{1}{P} \frac{d\psi}{dt} = \frac{K(d\pi/dt)}{[P_i + \pi(P_m - P_i)][\pi(1 - K) + K]^2}. \quad (2)$$

Здесь  $\pi = (P - P_i)/(P_m - P_i)$  есть безразмерное давление в бомбе;  $P_i$  – давление, создаваемое воспламенителем;  $P_m$  – максимальное давление в бомбе; коэффициент  $K = (1 - V_0\Delta)/(1 - \Delta/\rho_0)$ , где  $V_0$  есть коэффциентом продуктов горения,  $\Delta$  – плотность заряжения и  $\rho_0$  – максимальная плотность пороха. Формулы выведены в предположениях, что горение исследуемого пороха начинается после завершения горения воспламенителя, температура газов в процессе горения остается постоянной и потерями тепла в стенки бомбы можно пренебречь. Пример результатов опытных данных обработки с использованием формул (1) и (2) при  $V_0 = 0.95 \text{ см}^3/\text{г}$  и  $\rho_0 = 1.58 \text{ г}/\text{см}^3$  приведен на рис. 2. О прогрессивности горения можно судить по доле пороха, сгоревшего на участке роста интенсивности газообразования и по величине отношения интенсивностей газообразования в точке максимума и в начале горения пороха. Видно, что при нанесении полимерной пленки прогрессивность горения пороха заметно повышается, а диаграмма  $\Gamma$ – $\Psi$  приобретает характерную куполообразную форму за счет заметного снижения интенсивности горения пороха на начальной фазе и повышения до 50% доли пороха, сгорающего прогрессивно.

### ОПЫТЫ В СОПЛОВОЙ БОМБЕ С ДОЖИГАТЕЛЬНОЙ КАМЕРОЙ

Схема сопловой бомбы приведена на рис. 3. Бомба состоит из стальной толстостенной цилиндрической оболочки (зарядной камеры) внутренним диаметром 19 мм и длиной 120 мм с отверстиями под четыре пьезокварцевых датчика давления на расстоянии 20 мм один от другого и дожигательной камеры объемом  $270 \text{ см}^3$ , в верхней крышке которой имеется сопло для сброса давления. Еще один пьезокварцевый датчик служит для измерения давления в дожигательной камере. Заряд из семиканальных зерен пороха марки 5/7 с

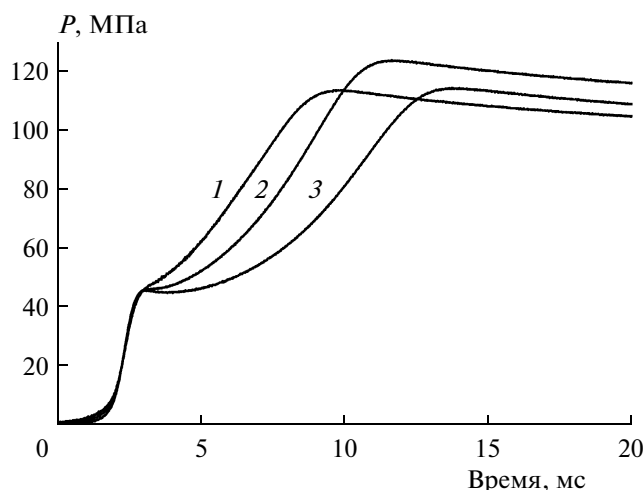


Рис. 1. Влияние содержания ингибитора на диаграмму давление–время в манометрической бомбе. Образцы насыпной плотности: 1 – без ПВБ, 2 – с 1.85% ПВБ, 3 – с 4.3% ПВБ.

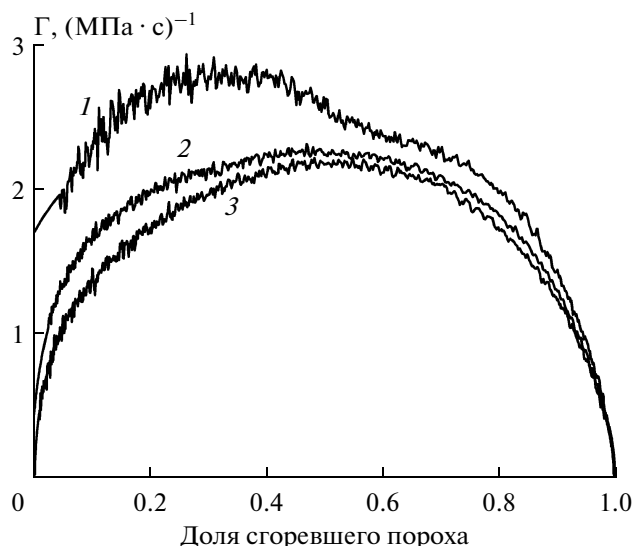
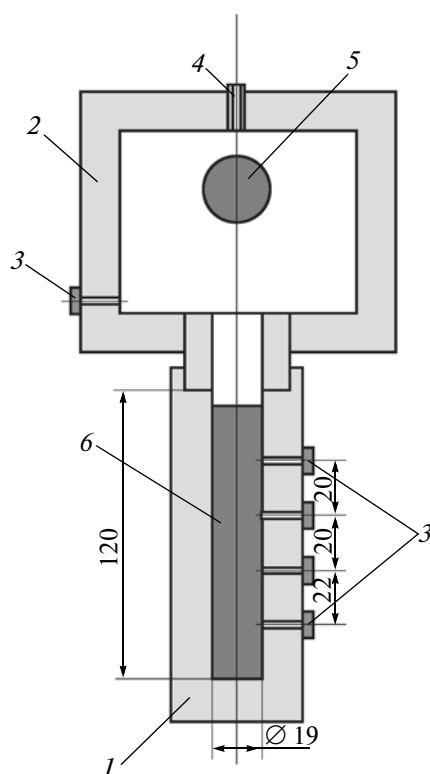


Рис. 2. Повышение прогрессивности горения при нанесении на поверхность зерен пороха пленочного покрытия. Зависимость интенсивности газообразования от доли сгоревшего пороха при разном содержании ПВБ. Образцы насыпной плотности: 1 – без ПВБ, 2 – с 1.85% ПВБ, 3 – с 4.3% ПВБ.

покрытием из ПВБ прессовали порционно прямо в канал зарядной камеры. Горение инициировали электрозапалом марки МБ-2 и навеской воспламенителя (смесь 1 г дымного пороха и 10 г тонко-сводного пироксилинового пороха марки Сокол). Электрозапал размещали в дожигательной камере. Сгорание воспламенителя создавало в бомбе давление, равное  $\approx 40 \text{ МПа}$ , с временем нарастания 5–6 мс. В опытах варьировали процент покрытия и плотность заряда. Пример регистрации давления для заряда из зерен пороха с 4.5% ПВБ



**Рис. 3.** Схема сопловой бомбы: 1 — зарядная камера, 2 — дожигательная секция, 3 — пьезокварцевые датчики давления, 4 — сопло, 5 — воспламенитель, 6 — ВЗКГ, (все размеры даны в мм).

начальной плотностью  $1.36 \text{ г/см}^3$  и длиной 109 мм дан на рис. 4. На кривых зависимости давления от времени можно выделить несколько характерных участков. Начальный участок до выполаживания кривой, записанной для давления в дожигательной камере, отвечает горению воспламенителя. Следующий участок, на котором записи датчиков давления, размещенных вдоль заряда, разделены определенной задержкой, отвечает стадии распространения волны горения вдоль заряда. На этой стадии имеет место значительный градиент давления вдоль заряда, связанный с распространением фронта волны. Наконец, после завершения стадии распространения волны горения давление по длине дожигательной камеры выравнивается, и все пять датчиков регистрируют практически одинаковое синхронно возрастающее давление. Эта стадия отвечает одновременному горению всех зерен воспламенившегося заряда.

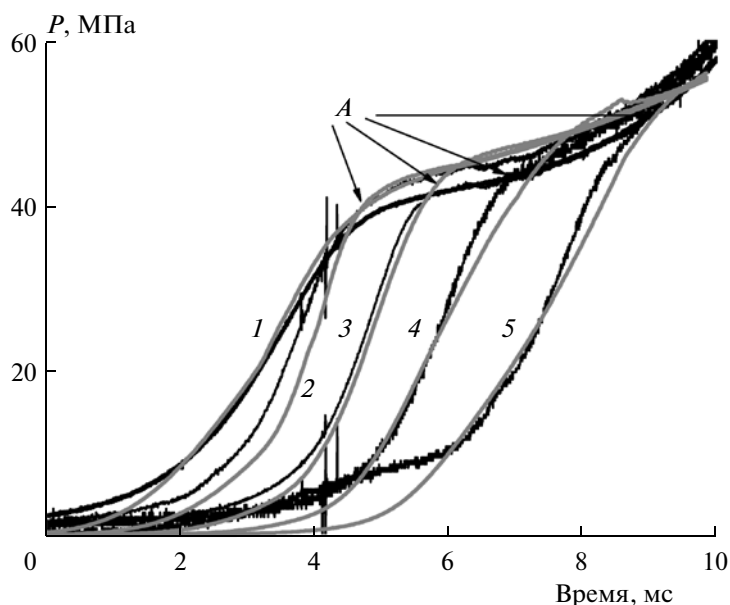
Ранее путем экспериментальных наблюдений [5] и теоретического анализа [4] было показано, что в тот момент, когда фронт горения проходит место расположения датчика, на соответствующей диаграмме темп роста давления резко снижается (эти моменты указаны точками А на рис. 4). Используя

эти точки для определения скорости фронта горения, получим, что на всех трех базах измерения волна горения имеет примерно постоянную скорость, равную  $\sim 13 \text{ м/с}$ . Давление во фронте волны составляет на уровне 35–50 МПа. В опытах с блочным зарядом меньшей начальной плотности ( $1.2 \text{ г/см}^3$ ) скорость конвективного горения также оказалась примерно постоянной по длине заряда; ее величина возросла и составила 25 м/с. Если уменьшить содержание ингибитора, то скорость конвективного горения также возрастает.

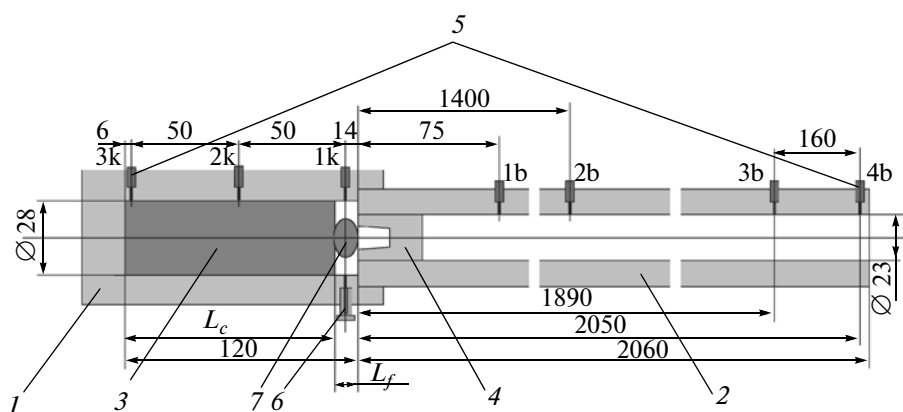
### ОПЫТЫ В 23-МИЛЛИМЕТРОВОЙ ГЛАДКОСТВОЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ

Схема 23-миллиметровой лабораторной гладкоствольной установки дана на рис. 5. Установка состоит из зарядной камеры цилиндрической формы (диаметр — 28 мм, длина — 120 мм, объем —  $74 \text{ см}^3$ ) и ствола диаметром 23 мм и длиной 2.06 м. Камера оснащена тремя датчиками давления (1к, 2к, 3к), размещенными на расстоянии 50 мм друг от друга. Еще четыре датчика давления (1б, 2б, 3б, 4б) размещены по длине ствола на расстояниях 75, 1400, 1890 и 2050 мм от его входа. Их сигналы использовались как отметчики времени прохождения снаряда. По траектории движения снаряда определяли дульную скорость. Заряд прессовали порционно в зарядную камеру. Метаемое тело — цилиндр из дуралюмина с узким кольцевым выступом для уплотнения канала ствола. Горение инициировали электрозапалом и навеской дымного пороха, воспламенитель размещался в зазоре между зарядом и метаемым телом. В опытах варьировали плотность заряда и массу воспламенителя. Условия и результаты опытов для стадии конвективного горения заряда, полученные обработкой начальной фазы записей датчиков 1к, 2к и 3к, приведены в табл. 1 и 2 соответственно. Там же для сравнения приведены условия и результаты двух опытов с классическим зарядом насыпной плотности из семиканального пороха марки 6/7 (диаметр гранул — 3.2 мм, длина — 6 мм). Пример регистрации для опыта G4 с блочным зарядом плотностью  $1.2 \text{ г/см}^3$  из зерен пороха марки 5/7 + 4% ПВБ дан на рис. 6.

Чтобы оценить скорость конвективного горения, мы применили тот же способ определения положения фронта пламени на записях давления по точке резкого ослабления градиента давления, который использовался выше. Результаты оценки вместе с моментами времени прохождения фронтом пламени соответствующих датчиков давления и фиксируемыми ими значениями давления в этот момент приведены в табл. 2. В последнем столбце таблицы приведены значения среднего темпа роста давления во фронте волны. Видно, что скорость волны конвективного горения блочных зарядов благодаря пленке ингибитора во



**Рис. 4.** Регистрация горения в сопловой бомбе с дожигательной секцией (черные линии) и результаты численного моделирования (серые линии). Заряд длиной 109 мм из зерен пороха с 4.5% ПВБ, начальная плотность – 1.36 г/см<sup>3</sup>. Положение датчиков давления: 1 – дожигательная камера, 2 – 22 мм от открытого торца заряда, 3 – 42 мм, 4 – 62 мм, 5 – 84 мм; А – точки, принятые в качестве момента прохождения фронта конвективного горения.



**Рис. 5.** Схема 23-миллиметровой лабораторной ствольной установки: 1 – зарядная камера, 2 – ствол, 3 – ВЗКГ, 4 – метаемое тело, 5 – пьезокварцевые датчики давления, 6 – электрозапал, 7 – дополнительная навеска воспламенителя (измельченный дымный порох). Все размеры даны в мм,  $L_c$  – длина ВЗКГ,  $L_f$  – длина свободного объема между торцом ВЗКГ и метаемым телом.

много раз ниже, чем у классического заряда насыпной плотности; эффект тем значительней, чем выше плотность ВЗКГ. По сравнению с опытами в сопловой бомбе, скорость конвективного горения, измеренная в ствольной установке, оказалась заметно выше; причины будут рассмотрены в следующем разделе.

Результаты баллистических опытов приведены в табл. 3. Здесь даны максимальное давление выстрела, максимальный темп роста давления в камере и интеграл давления, найденные по диаграмме, записанной датчиком 1к. Также приведены показания

отметчиков времени прохождения метаемого тела вдоль ствола, которые использовались для построения траектории движения метаемого тела и определения дульной скорости. Траектория метаемого тела строилась следующим образом. Диаграмма давление–время, записанная датчиком 1к, сглаживалась, чтобы убрать шум, и загружалась вместе с термодинамическими свойствами продуктов горения пороха и характеристиками метательной установки в качестве входных данных в стандартную компьютерную программу внутренней баллистики [6]. Расчеты проводились с подгонч-

Таблица 1. Условия опытов в 23-миллиметровой ствольной установке

Номер опыта	Марка пороха + % ПВБ	Масса воспламенителя, г	Длина заряда, мм	Плотность заряда, г/см <sup>3</sup>	Плотность заряжения, г/см <sup>3</sup>	Масса заряда, г	Масса снаряда, г
G3	6/7	2.4	116.5	0.93	0.87	67.5	172
G8	6/7	2.4	116.5	0.93	0.87	67.5	230
G4	5/7 + 4%	2.4	111	1.2	1.09	82	172
G5	5/7 + 4%	2.4	97.5	1.37	1.09	82	171
G9	5/7 + 4.3%	2.4	97.5	1.37	1.09	82	170
G10	5/7 + 4.3%	5.4	97.5	1.37	1.1	82	170
G11	5/7 + 4.3%	5.4	94.0	1.42	1.1	82	170
G12	5/7 + 4.3%	8.4	97.5	1.37	1.12	82	170

Таблица 2. Суммарные результаты измерений в 23-миллиметровой ствольной установке. Фаза конвективного горения

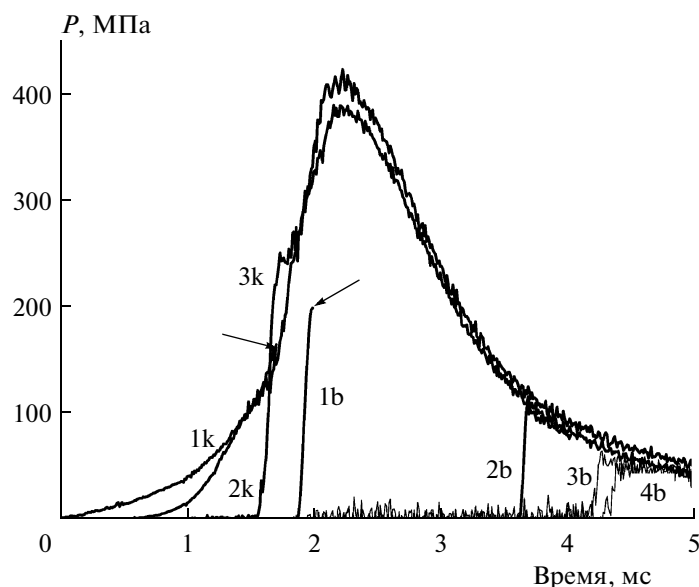
Номер опыта	Марка пороха + % ПВБ	Датчик 1к: $t_1/(P_1)$ мс/МПа	Датчик 2к: $t_2/(P_2)$ мс/МПа	Датчик 3к: $t_3/(P_3)$ мс/МПа	$t_{CB}$ , мс	$W_{12}$ , м/с	$W_{23}$ , м/с	$(dP/dt)_{av}$ , МПа/мс
G3	6/7	0.19/10	—	0.4/34	0.21	—	476	110
G8	6/7	0.32/10	0.47/18	0.61/34	0.29	333	357	80
G4	5/7 + 4%	0.61/17	1.24/72	1.58/146	0.97	79	147	110
G5	5/7 + 4%	1.8/18	3.17/76	3.96/200	2.16	36.5	63	140
G9	5/7 + 4.3%	—	0.83/64	1.64/190	—	—	62	140
G10	5/7 + 4.3%	—	1.83/67	2.32/170	—	—	102	200
G11	5/7 + 4.3%	0.33/18	1.45/94	2.15/180	1.82	44.5	71	90
G12	5/7 + 4.3%	0.23/32	0.87/90	1.37/192	1.14	78	100	140

Примечания: в столбцах 3–5 приведены времена и давления в момент прохождения датчика фронтом конвективного горения;  $t_{CB}$  – время прохождения волны конвективного горения на базе между первым и третьим датчиками;  $W_{12}$  и  $W_{23}$  – скорость волны конвективного горения на базах между первым–вторым и вторым–третьим датчиками;  $(dP/dt)_{av}$  – средний темп роста давления на стадии конвективного горения.

Таблица 3. Результаты баллистических измерений в 23-миллиметровой ствольной установке

Номер опыта	$P_{max}$ , МПа	$V_d$ , м/с	$(dP/dt)_{max}$ , МПа/мс	Интеграл давления, МПа · мс	$t_1-t_3-t_4-t_5$ , мс
G3	275	880	400	510	1.27–(“)–4.04–4.23
G8	327	835	430	600	(“)–3.79–4.40–4.59
G4	384	1075	900	640	2.01–3.78–4.27–4.41
G5	322	970	460	645	(“)–(“)–6.72–6.88
G9	323	1010	540	590	1.77–3.80–4.34–4.46
G10	319	1040	740	560	(“)–(“)–5.02–5.16
G11	242	930	370	630	2.03–(“)–4.9–5.06
G12	313	1008	570	660	(“)–(“)–4.08–4.25

Примечания: в последнем столбце приведены времена прохождения снарядом датчиков, расположенных вдоль ствола в точках 75, 1400, 1890 и 2050 мм; отметка (“) указывает, что в этой точке регистрация отсутствовала по техническим причинам;  $P_{max}$  и  $V_d$  – максимальное давление и дульная скорость.



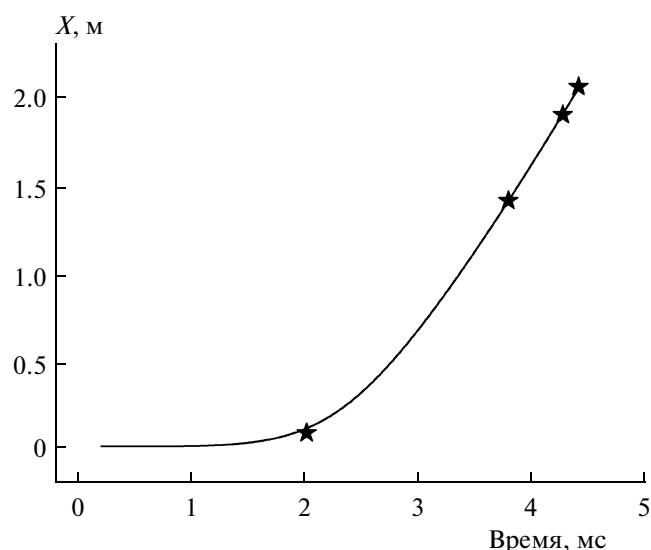
**Рис. 6.** Записи датчиков давления, полученные в опыте G4 с ВЗКГ плотностью  $1.2 \text{ г/см}^3$  из зерен пороха марки 5/7 + 4% ПВБ. Стрелки указывают моменты времени, когда сигналы датчиков 3к и 1б были оборваны по техническим причинам.

ным параметром  $F_{fit}$ , который входит как дополнительный множитель в уравнение для коэффициента фиктивности [6]:  $\varphi = F_{fit}[1.06 + \omega/(3q)]$ , где  $\omega$  и  $q$  – массы заряда и метаемого тела соответственно. Значение параметра  $F_{fit}$  подбиралось таким образом, чтобы расчетная траектория метаемого тела проходила точно через точки, полученные по записям датчиков давления вдоль ствола. Обычно это значение лежало в диапазоне 1.2–1.25. Пример расчета траектории метаемого тела для опыта G4 дан на рис. 7. Дульную скорость также определяли из этих расчетов, так как точность измерения на последней базе между датчиками 3b и 4b (расстояние между ними равно всего 16 мм) была недостаточной.

По сравнению с классическим зарядом насыпной плотности выстрелы с блочными зарядами демонстрируют в целом более высокие баллистические характеристики. Интерполяция данных к одинаковому максимальному давлению дает, что ВЗКГ при выстреле с метаемым телом массой 170 г обеспечивает прирост дульной скорости по сравнению с классическим выстрелом не менее чем 100 м/с. Что касается влияния варьируемых характеристик, то, как видно из представленных данных, увеличение плотности блочного заряда приводит к уменьшению максимального давления; дульная скорость и темп роста давления в камере также снижаются. При увеличении массы воспламенителя максимальное давление практически не изменяется, а дульная скорость достигает своего максимального значения и далее снижается.

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ГОРЕНИЯ БЛОЧНЫХ ЗАРЯДОВ

Для расчетов использовалась компьютерная программа, разработанная ранее в одномерном приближении применительно к конвективному горению ВЗКГ [4]. В основе этой программы лежит модель, полученная модификацией базовой



**Рис. 7.** Траектория движения снаряда по стволу (сплошная линия) и экспериментальные отметки времени прохождения снарядом точек расположения датчиков, отмеченные звездами, в опыте G4. Значение дульной скорости – 1075 м/с.

модели конвективного горения [7], опирающейся на уравнения механики двухфазных реагирующих сред [8]. Основные положения и уравнения модели, а также метод численного интегрирования можно найти в работе [4]. Здесь мы дадим лишь краткое описание модели.

Модель рассматривает процессы, проходящие на двух уровнях. Макроуровень составляют уравнения неразрывности, движения, сохранения энергии и состояния для двухфазной среды. Мезоуровень представлен элементарной ячейкой, которая воспроизводит пору и окружающий ее порох, покрытый слоем полимера. Уравнение теплопроводности, определяющее распределение температуры в твердом своде ячейки, используется, чтобы найти момент зажигания пороха. Зерна пороха составляют твердую фазу, а продукты горения пороха и воспламенителя вместе с газом, первоначально заполнявшим поры, составляют газовую фазу. Пористость (объемная доля газовой фазы) определяет соотношение фаз в каждой точке. Газовая фаза подчиняется уравнению состояния с коволюмом, твердая фаза считается несжимаемой. Каждая фаза имеет свою внутреннюю энергию, температуру, плотность, давление и скорость течения. При сжимающих нагрузках твердая фаза ведет себя как идеальное вязкопластическое тело. Разность между давлением твердой фазы и давлением в газе определяется межгранулярным взаимодействием частиц пороха друг с другом. Все характеристики фаз, как это принято в механике сплошных сред, получаются формальным осреднением по объему, содержащему много частиц пороха, хотя число этих частиц, очевидно, не может быть столь же большим, как число молекул в традиционном случае газовых или жидких сред.

Следующие процессы образуют в совокупности конвективное горение: фильтрационное течение газа в промежутках между зёрнами пороха (или в порах); передача тепла в результате конвекции от газа к поверхности зёрн пороха; воспламенение и горение пороховых зёрн; а также движение твердой фазы под действием возникающих напряжений, в том числе уплотнение (уменьшение пористости) и диспергирование (отток горящих зёрн вместе с газами в дожигательную камеру). Воспламенение (начало горения) зёрн пороха происходит, когда в результате нагрева температура поверхности достигает заданной температуры воспламенения. Пороховое зерно, покрытое слоем полимерной пленки, воспламеняется после большой задержки (по сравнению с зерном без пленки), так как пленка служит барьером для потока тепла, передаваемого от горячих газов, фильтрующихся в поры, к поверхности пороха.

В модели влияние пленки учитывается следующим образом. Во-первых, предполагается, что для того чтобы зажечь порох, нужно вначале на-

греть и удалить с его поверхности пленку и затем создать прогретый слой в порохе с тем, чтобы температура на поверхности пороха достигла температуры воспламенения. Удаление пленки осуществляется в режиме пиролиза под действием потока тепла, поступающего из газа, при заданной постоянной температуре. Во-вторых, воспламенение пороха, покрытого пленкой полимера, происходит в очагах, которые занимают лишь часть наружной поверхности зерна (притом что "пятна" контакта с соседними зёрнами закрывают часть поверхности зёрн от действия горячих газов, каналы зёрн также реально оказываются закрытыми). Таким образом, воспламенение порохового зерна включает несколько фаз: инертный нагрев до начала пиролиза полимерной пленки; удаление пленки в ходе пиролиза до начала горения пороха в очагах, освободившихся от пленки; постепенный охват горением поверхности зерна по мере удаления остатков пленки и воспламенения каналов. Инертный нагрев и удаление пленки до воспламенения пороха в очагах моделируются решением уравнения теплопроводности для элементарной ячейки, представляющей мезоуровень задачи. Начальная поверхность очагов, а также время, в течение которого горение охватывает всю поверхность зерна, являются эмпирическими константами и используются в виде поправок, задающих изменение площади поверхности горения порохового зерна [4, 5]. Массовая скорость горения в единице объема равна произведению удельной поверхности горения пороховых зёрн на плотность пороха и на линейную скорость послыоного горения пороха, которая считается известной функцией давления.

Задача решается численно с использованием неявной разностной схемы с матричной прогонкой и расщеплением на макро- и мезоуровни. Расчетная сетка по длине заряда, однородная в начальный момент времени, трансформируется в ходе вычислений, сгущаясь в зонах, где градиенты переменных возрастают, и разреживаясь там, где градиенты уменьшаются. Начальные условия задаются в виде однородных по длине заряда начальных значений для всех характеристик обеих фаз и нулевых значений скоростей течения. Процесс начинается в момент времени  $t = 0$  как горение воспламенителя, размещенного в дожигательной камере. Скорость горения воспламенителя задается в виде функции времени с тремя коэффициентами, значения которых подбираются таким образом, чтобы расчетная кривая воспроизводила начальный участок экспериментальной диаграммы давления в бомбе. Продукты горения воспламенителя, проникая через открытый торец в глубь заряда, прогревают и воспламеняют поверхность пор, формируя волну конвективного горения, которая распространяется вдоль заряда. Доожигательная камера, в которой горят воспламенитель и зерна



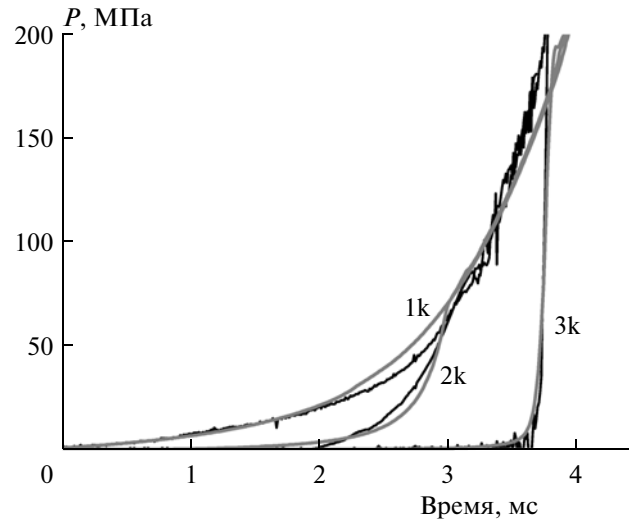
пороха, вынесенные с потоком газов из зарядной камеры, рассматривается как реактор полного смешения.

Межфазное трение является ключевым фактором течения газа в пористой среде. От его величины существенным образом зависит скорость конвективного горения. Чтобы рассчитать межфазное трение, обычно применяют полуэмпирическую двухчленную формулу Эргана [9]:

$$\begin{aligned} \dot{F} = & A_s^2(U_g - U_k)\mu_g b_1 / 4\phi + \\ & + A_s \rho_g (U_g - U_k) |U_g - U_k| b_2. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь  $A_s$  – удельная поверхность зерен в единице объема,  $U_g$  и  $U_k$  – скорость течения газа и конденсированной фазы,  $\rho_g$  и  $\mu_g$  – плотность и динамическая вязкость газа,  $b_1$  и  $b_2$  – эмпирические коэффициенты,  $\phi$  – пористость. Первое слагаемое в формуле (7) отвечает за потери импульса, вызванные вязким трением, а второе – связано с гидравлическими потерями, которые вызваны хаотическим изменением направления газовых струй, фильтрующихся в поры. Обычно для коэффициентов  $b_1$  и  $b_2$  используют постоянные значения, которые были определены в опытах с насыпными и взвешенными слоями при изотермической фильтрации. Однако опыты с консолидированными слоями показывают, что при пористости ниже 0.2 наблюдается резкое усиление межфазного трения [10, 11]. Одновременно возрастает экспериментальный разброс, а данные, полученные для разных материалов при одинаковой пористости, демонстрируют несовместимость. Фактически для каждого конкретного исследуемого материала следует проводить отдельные измерения. В расчетах, которые представлены ниже, использованы численные значения коэффициентов  $b_1$  и  $b_2$ , приведенные в работе [11].

Приведем основные характеристики пороха, его продуктов горения и полимера, которые использовались в качестве входных параметров задачи. Плотность пороха  $\rho_0 = 1.58 \text{ г/см}^3$ ; диаметр гранул  $d_0 = 0.36 \text{ мм}$ ; коэффициент теплопроводности –  $0.25 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$  и удельная теплоемкость –  $1.5 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$ , одинаковые у пороха и полимера; межгранулярное напряжение как функция пористости:  $\sigma [\text{МПа}] = 125(1 - \phi/0.46)^{1.1}$ ; начальная пористость заряда  $\phi_0 = 0.14$ ; температура воспламенения –  $630 \text{ К}$ ; скорость послыоного горения в виде линейной функции от давления с реперной точкой –  $13.2 \text{ мм/с}$  (с учетом вклада горения каналов) при давлении  $10 \text{ МПа}$ ; содержание полимера –  $4.5 \text{ вес. \%}$ ; плотность полимера –  $1.1 \text{ г/см}^3$ ; затраты тепла на пиролиз –  $380 \text{ Дж/г}$ ; температура пиролиза –  $620 \text{ К}$ ; доля поверхности гранулы, свободная от пленки полимера в момент воспламенения, равна  $0.3$ ; время охвата горением всей поверхности гранулы –  $1.5 \text{ мс}$ ; химическая энер-

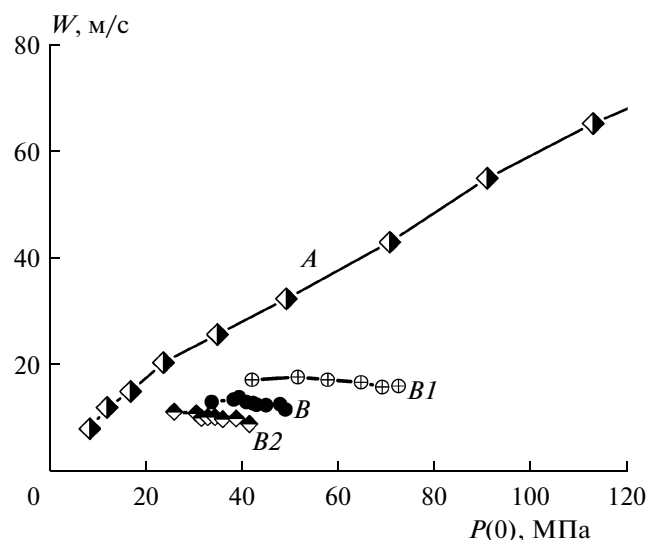


**Рис. 8.** Сравнение экспериментальных (черные линии) и расчетных (серые линии) диаграмм давление–время для трех точек вдоль камеры сгорания 23-миллиметровой лабораторной ствольной установки. Опыт G5, ВЗКГ плотностью  $1.36 \text{ г/см}^3$  из зерен пороха марки 5/7 + 4.0% ПВБ, расстояние между датчиками давления –  $50 \text{ мм}$ .

гия –  $4.1 \text{ МДж/кг}$ ; удельная теплоемкость газов  $c_v = 1.2 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$ ; показатель политропы –  $1.25$ ; вязкость газов  $\mu_g = 6 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ;  $V_0 = 0.95 \text{ см}^3/\text{г}$ ; начальное состояние:  $T_0 = 300 \text{ К}$  и  $P_0 = 0.1 \text{ МПа}$ .

Примеры расчетов для двух опытов, проведенных с зарядами начальной плотностью  $1.36 \text{ г/см}^3$  в бомбе с дожигательной камерой и в ствольной установке даны соответственно на рис. 4 и 8, где они сопоставлены с опытными данными. Можно видеть хорошее согласие расчетов с экспериментом, которое было получено также и для остальных проведенных опытов. Применим теперь численное моделирование для того, чтобы объяснить те различия в скорости конвективного горения, которые наблюдаются, когда опыты проводятся в бомбе с дожигательной камерой или в ствольной установке. Результаты расчетов для двух упомянутых выше опытов с зарядами плотностью  $1.36 \text{ г/см}^3$  представлены на рис. 9 в виде зависимостей скорости конвективного горения от давления на воспламенением торце заряда. Можно видеть, что при горении в ствольной установке скорость конвективного горения почти линейно возрастает по мере того как растет давление  $P(0)$ . При этом значения скорости в 2–3 раза превышают скорость конвективного горения, полученную в бомбе с дожигательной камерой при равном давлении.

Интересно, что в условиях бомбы с дожигательной камерой скорость конвективного горения остается примерно постоянной, несмотря на



**Рис. 9.** Расчетный график зависимости скорости конвективного горения от давления на торце заряда, которое изменяется с течением времени, применительно к опытам с зарядом плотностью  $1.36 \text{ г/см}^3$  в 23-миллиметровой ствольной установке (A) и в сопловой бомбе (B). Влияние массы воспламенителя: B1 — масса увеличена на 30%, B2 — масса уменьшена на 30%.

рост давления, и даже можно видеть некоторое ее снижение к концу процесса. В дополнение к расчетному варианту, который воспроизводил реальный опыт, мы провели два других расчета. В них масса воспламенителя (и, следовательно, давление, создаваемое воспламенителем) была увеличена или уменьшена на 30%. Эти расчеты также показаны на рис. 9. Видно, что форма зависимости скорости конвективного горения от давления осталась прежней, однако сама скорость изменяется вслед за изменением массы воспламенителя.

Анализ результатов расчетов показывает, что различие в скоростях и динамике изменения скорости с ростом давления, наблюдаемое для бомбы с дожигательной камерой и ствольной установки, связано с темпом роста давления, которое в ствольной установке составляет  $100 \text{ МПа/мс}$  и более, на порядок величины превышает темп роста давления в бомбе. Как следствие, в ствольной установке заметно (в 2–3 раза) возрастает скорость течения газов во фронте пламени, что в конечном счете и определяет более высокую скорость конвективного горения и наблюдаемый рост последней при увеличении давления.

## ВЫВОДЫ

- Покрытие крупных семиканальных пороховых зерен тонкой полимерной пленкой из поливинилбутирала приводит к заметному повышению прогрессивности горения. Этот результат получен,

несмотря на то, что сами эти зерна, без полимерной пленки, горят с высокой прогрессивностью. Блочный заряд, изготовленный прессованием до плотности  $1.2\text{--}1.45 \text{ г/см}^3$  из зерен пороха, покрытых пленкой, были испытаны в 23-миллиметровой лабораторной гладкоствольной установке. Они показали гораздо более высокие баллистические характеристики, чем заряды классической конфигурации, изготовленные из тех же зерен, не покрытых полимерной пленкой. Прирост дульной скорости при равном максимальном давлении в камере достиг  $100 \text{ м/с}$ . Он может быть увеличен еще более при оптимизации свойств заряда.

- Скорость конвективного горения блочных зарядов оказалась довольно низкой (в 5–10 раз ниже, чем скорость конвективного горения порохового заряда классической конфигурации, которая составляет около  $400 \text{ м/с}$ ). В результате распространение горения на весь блочный заряд занимает сравнительно большое время, что обеспечивает одну из составляющих высокой прогрессивности горения.

- Экспериментальные исследования по конвективному горению блочных зарядов дополнены численным моделированием. В модели предполагается, что воспламенению порохового зерна, покрытого полимерной пленкой, предшествует удаление этой пленки с его поверхности в ходе пиролиза под действием потока тепла, поступающего от потока горячих газов. Получено хорошее согласие расчетов с экспериментальными профилями давления. Далее численное моделирование использовано с целью выяснить, почему в ствольной установке блочный заряд горит с более высокой скоростью (примерно в 2–3 раза), чем в сопловой бомбе с дополнительной камерой. Показано, что причиной является гораздо более высокий темп роста давления, который в ствольной установке оказался более чем на порядок величины выше, чем в бомбе. Это привело к тому, что скорость газов во фронте волны конвективного горения увеличилась в несколько раз, а соответственно, выросла и скорость конвективного горения.

Авторы благодарят О.С. Грызлову, которая провела опыты по термическому разложению поливинилбутирала.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 13-03-00294).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сулимов А.А., Ермолаев Б.С. // Хим. физика. 1997. Т. 16. № 9. С. 51; № 10. С. 77.
2. Сулимов А.А., Ермолаев Б.С., Королев В.П. и др. // Тр. 2-й Всерос. конф. "Энергетические конденса-

- рованные системы”. Черноголовка: ИПХФ, 2004. С. 226.
3. Сулимов А.А., Сукоян М.К., Михайлов Ю.М. и др. Метательный заряд: Патент РФ на изобретение № 2153144 // Б.И. 2000. № 20.
  4. Ермолаев Б.С., Сулимов А.А., Беляев А.А. и др. // Хим. физика. 2001. Т. 20. № 1. С. 84.
  5. Романьков А.В., Сулимов А.А., Сукоян М.К. и др. // Там же. 1992. Т. 11. № 7. С. 983.
  6. Серебряков М.Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. М.: Оборонгиз, 1962.
  7. Ермолаев Б.С., Новожилов Б.В., Посвянский В.С. и др. // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21. № 5. С. 3.
  8. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987.
  9. Macdonald I.F., El-Sayed M.S., Mow K. et al. // Ind. Eng. Chem. Fundamen. 1979. V. 18. № 3. P. 199.
  10. Geertsma J. // Soc. Petroleum Engin. J. 1974. V. 14. № 5. P. 445.
  11. Хоменко Ю.П., Ищенко А.Н., Касимов В.З. Математическое моделирование внутрибаллистических процессов в ствольных системах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999.