

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЙ ЗАЖИГАНИЯ В ЗАКРЫТОМ СОСУДЕ НА СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО ТОПЛИВА

З. К. Лесиджевски, З. Сурма

Институт технологии вооружения, Военный университет технологии, 00-908 Варшава, Польша
Zbigniew.Leciejewski@wat.edu.pl

Широко используемый экспериментальный метод определения динамических характеристик горения оружейных порохов заключается в сжигании определенного количества топлива в закрытом сосуде (бомбе) и регистрации профиля изменения давления во времени. В работе приведена экспериментальная проверка законности использования результатов, полученных при стандартных условиях экспериментов в бомбе. Рассмотрено влияние условий воспламенения топлива на возможные погрешности при определении скорости горения в бомбе. С этой целью выполнены эксперименты с мелкозернистым одноосновным порохом в обычной бомбе и микробомбе с использованием различных методов зажигания при одинаковой плотности заряжания. Результаты экспериментов и вычислений показывают существенное влияние типа применяемой системы зажигания на измерение скорости горения и другие динамические характеристики горения топлива, такие как интенсивность газообразования, абсолютная и относительная скорости газообразования.

Ключевые слова: оружейный порох, испытания в бомбе, система зажигания.

ВВЕДЕНИЕ

До настоящего времени методика с использованием замкнутого объема (бомбы) для определения характеристик горения пороха, применяемых во внутрибаллистических расчетах (абсолютные измерения) и в сравнительных целях (относительные измерения), базировалась [1–3] на экспериментах по сжиганию в бомбе, выполненных в ограниченном диапазоне плотности заряжания Δ (обычно $\Delta = 100$ и/или 200 кг/м³). Экспериментальные результаты анализировали в предположении, что функция площади поверхности горения $\Phi(z)$ заряда топлива зависит не только от степени выгорания z , но, в частности, и от плотности заряжания Δ . Связь между скоростью горения и площадью поверхности горения и их зависимость от плотности заряжания установлена в [1] из анализа функции удельной интенсивности газообразования $L(z)$ (или динамической интенсивности газообразования, по [2]) при различных насыпных плотностях и различных давлениях воспламеняющих газов.

Оружейный порох загорается в результате переноса тепла горячими газами от нагрето-

го до высокой температуры вещества воспламенителя. Перенос тепла к пороховому заряду осуществляется по двум механизмам — конвекцией и излучением. Задача зажигания изучена в рамках теории тепловой модели. Для бездымных порохов тепловая теория рассматривает конденсированную фазу как анизотропное гомогенное твердое тело. В работе [4] представлена модель изменения линейной скорости горения, в которой учитывается уплотнение топливных ячеек, приводящее к нелинейной зависимости скорости горения от давления. В [5–7] подробно изложены очень интересные (с теоретической и практической точки зрения) результаты исследования времени зажигания и скорости горения пороха после воспламенения. В [8] выполнено моделирование теплового пограничного слоя потока продуктов воспламенителя вдоль поверхности пороха с использованием модели пограничного слоя, содержавшейся в программном обеспечении CHEMKINTM.

В данной работе обсуждается влияние условий воспламенения и горения при тестировании в бомбе на возможные ошибки в определении скорости горения. Обеспечение подобия условий горения различных порохов является существенной проблемой, особенно для относительных измерений. Соответствующие стан-

Z. K. Leciejewski, Z. Surma.

Institute of Armament Technology, Military University of Technology, 00-908 Warsaw, Poland.

дарты и инструкции [2, 3] рекомендуют различные условия зажигания, однако основным правилом остается использование хлопкового мешочка, содержащего 0.5 ÷ 2 г черного пороха (масса зависит только от плотности заряжения).

В экспериментах использовали мелкозернистый одноосновный порох с трубчатыми гранулами. Опыты проводили как в обычной бомбе, так и в микробомбе, применяя различные методы зажигания при одинаковой плотности заряжения.

1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Зависимость скорости горения топлива r от давления p аппроксимируется обычно линейным законом [1]

$$r_l = ap \quad (1)$$

или степенным [9]

$$r_e = \beta p^n. \quad (2)$$

Экспериментальное и теоретическое исследование скорости горения порохов указывает на ограниченность применения линейного закона скорости горения [10–12]. В связи с этим при внутрибаллистических расчетах для оружейных систем используется, как правило, экспоненциальная зависимость скорости горения от давления [9, 13, 14].

Анализ процедуры тестирования в традиционной бомбе и общих принципов стандартов для закрытых сосудов [2, 3] позволил нам сформулировать следующие предположения:

1) условия испытаний в бомбе (например, система воспламенения, плотность заряжения) не оказывают влияния на расчет параметров в законах скорости горения;

2) параметры используемого закона скорости горения постоянны (абсолютные величины) для данного топлива и не зависят от давления, создаваемого горением топлива.

Для проведения сравнения (относительные измерения) данные экспериментов в бомбе обычно представляют в виде зависимости скорости роста давления от давления (dp/dt от p). Используемые процедуры позволяют сравнивать пороха (тестируемые и образцовые) по таким параметрам, как абсолютная и относительная скорости газообразования, которые определены в [3, 15] следующим образом:

$$AQ = p_{\max} \int_0^1 f \left(\frac{dp}{dt} \right) d \left(\frac{p}{p_{\max}} \right), \quad (3)$$

$$RQ = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{(dp/dt)_{j, test}}{(dp/dt)_{j, std}}. \quad (4)$$

Абсолютная скорость газообразования AQ выражает полный импульс производной давления, вычисленный от момента начала горения пороха ($p/p_{\max} = 0$) до окончания ($p/p_{\max} = 1$). Используемые в числителе и знаменателе формулы (4) производные dp/dt измерены при одинаковых значениях мгновенного давления p . Для получения характеристического значения RQ осреднялся набор из n таких измерений в середине интервала давлений (между 25 и 75 % максимального давления p_{\max}). Обычно RQ выражают в процентах.

В данной работе проведено сравнение результатов экспериментальных исследований с целью обнаружить возможные различия в значениях задержки зажигания, а также коэффициентов в законе скорости горения. Для этого использовали различные системы поджига. Основной рассматриваемый вопрос — как связать тип системы поджига с ожидаемыми различиями в величинах скорости горения r (уравнения (1) и (2)), абсолютной AQ (3) и относительной RQ (4) скоростей газообразования. Хлопковый мешочек, содержащий 2 г черного пороха, был принят в качестве стандарта системы зажигания в сравнительных измерениях и расчетах.

Исследования проводили в двух различных бомбах: обычной (обычный закрытый сосуд — ОЗС) объемом 200 см³ и микробомбе (микрообъемный закрытый сосуд — МЗС) объемом 1.786 см³. МЗС сконструирован на основе 7.62-миллиметрового автоматного ствола, который обрезали для уменьшения внутреннего объема (рис. 1). В качестве системы воспламенения в нем использовалась часть от (7.62 × 54R)-миллиметровой гильзы со стандартным для этого типа патрона капсюлем ударного типа BERDAN, содержащим 0.032 г воспламеняющего вещества (на основе гремучей ртути).

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Была выполнена серия экспериментов для винтовочного пороха VT (зерно с одиночным

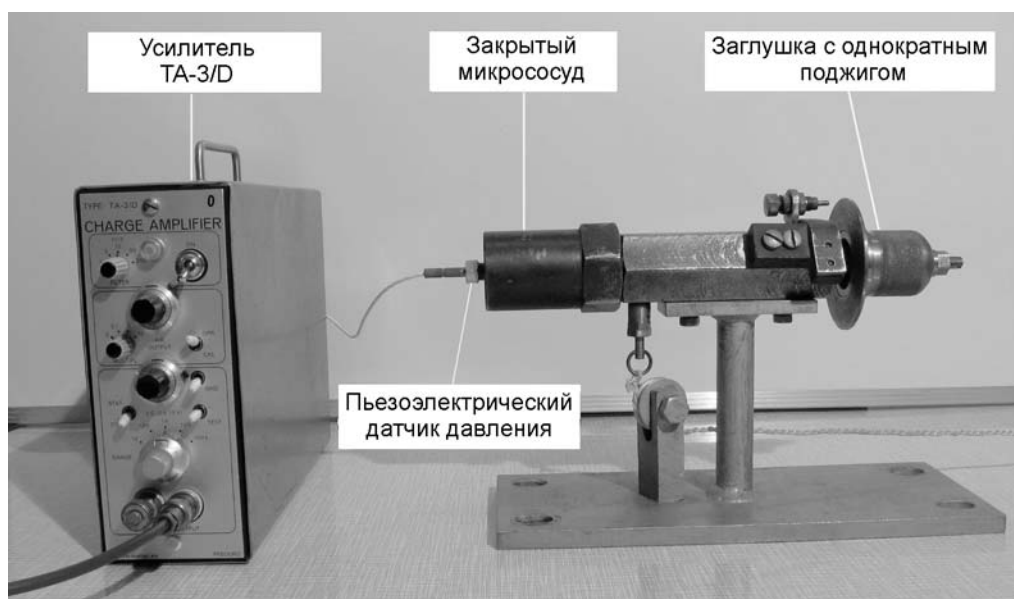


Рис. 1. Микробомба и система регистрации давления

каналом) с применением различных методов зажигания при одинаковой плотности заряжения ($\Delta = 100 \text{ кг/м}^3$) в ОЗС и МЗС. Все эксперименты проведены при температуре окружающей среды. Средний размер горящего свода зерна (0.325 мм), декларируемый производителем, проверяли непосредственными измерениями 150 гранул с использованием металлографического микроскопа НЕОРНОТ 21 и программного обеспечения LUCIA. Распределение размеров толщины свода (20 % с толщиной $0.30 \div 0.31 \text{ мм}$, 60 % — $0.32 \div 0.33 \text{ мм}$ и 20 % — $0.34 \div 0.35 \text{ мм}$) подтверждает декларацию производителя.

Давление измерялось пьезоэлектрическим датчиком НР1 5QP 6000M, сигнал которого усиливался усилителем TA-3/D и регистрировался 12-битовым аналого-цифровым преобразователем Keithley DAS-50 с частотой 1 МГц. Максимальная систематическая ошибка системы косвенного измерения давления составляла 1.1 %.

В случае геометрически правильной формы пороховых зерен с гладкой поверхностью скорость горения топлива может быть рассчитана по экспериментальной кривой $p(t)$ огневого теста в бомбе и по средним характеристикам (например, длина, толщина свода и т. д.) зерен из следующих уравнений:

согласно [1] — с использованием интеграла кривой давления

$$a = \frac{e_1}{I_p} = e_1 / \int_{t_0}^{t_1} p dt, \quad (5)$$

где e_1 — толщина слоя сгоревшего топлива (половина размера горящего свода зерна), I_p — полный импульс давления, рассчитанный от начала горения пороха (t_0) и до конца (t_1);

согласно [2] — на основе производной давления по времени

$$r = \frac{de}{dt} = \frac{de}{dz} \frac{dz}{dp} \frac{dp}{dt}, \quad (6)$$

где производная, связанная с функцией формы зерна, определена в виде

$$\frac{de}{dz} = \frac{V_{g1}}{S_{g1}} \frac{1}{\Phi(z)}. \quad (7)$$

Здесь z — массовая доля сгоревшего пороха, S_{g1} и V_{g1} — начальные поверхность и объем порохового зерна, производная для дифференциального уравнения состояния дана в виде

$$\frac{dz}{dp} = \frac{1}{p_{\max}} \frac{1 + \left(\alpha_p - \frac{1}{\rho_p} \right) \frac{p_{\max}}{f_p}}{\left[1 + \left(\alpha_p - \frac{1}{\rho_p} \right) \frac{p}{f_p} \right]^2}, \quad (8)$$

где α_p , f_p , ρ_p , p_{\max} — соответственно коволюм, сила пороха (оба параметра — параметры уравнения состояния Нобеля — Абеля),

плотность пороха и максимальное давление в эксперименте.

2.1. Результаты эксперимента в бомбе ОЗС

В экспериментах с ОЗС изучали влияние системы поджига на стадию воспламенения и характеристики горения топлива при использовании только электрического запала либо системы зажигания, состоящей из электрического запала и черного пороха (навески массой 2, 4, 6 или 8 г) (табл. 1, типы систем А, В1, В2, В3, В4). Требуемую массу ω_p исследуемого пороха определяли по пиростатической формуле [1] исходя из того, что плотность заряжания должна быть постоянной ($\Delta = 100 \text{ кг/м}^3$):

$$\omega_p = \Delta \left(W_0 - \frac{\omega_{bp}}{\rho_{bp}} \right).$$

Здесь ω_{bp} — масса черного пороха, ρ_{bp} — его плотность, W_0 — свободный объем ОЗС.

Изменение давления во времени представлено на рис. 2. Здесь максимальное давление

приведено с учетом добавки давления от системы поджига (p_{ign}). В соответствии с характерными параметрами черного пороха (масса ω_{bp} , сила пороха f_{bp} и коволом α_{bp}) давление p_{ign} может быть рассчитано по уравнению [1]

$$p_{ign} = \frac{f_{bp}\omega_{bp}}{W_0 - (\omega_p/\rho_p - NW_h) - \alpha_{bp}\omega_{bp}},$$

где N — количество зерен пороха, ρ_p — плотность пороха, W_h — общий объем внутренних отверстий пороховых зерен.

Зависимость $p(t)$ использовалась для вычисления скорости горения пороха и интенсивности газообразования $L(z)$. Кривая интенсивности газообразования отражает изменение геометрии порохового зерна и скорости горения по мере выгорания. Форма кривой указывает, является ли горение пороха прогрессирующим (увеличение скорости газогенерации при горении), регрессивным (уменьшение скорости газогенерации) или нейтральным. Результаты расчета динамической интенсивности газообразования $L(z)$ [2], вычисленные в соответствии с уравнением

$$L(z) = \frac{1}{p_z} \frac{dz}{dt} = \frac{1}{p_z} \frac{dz}{dp} \frac{dp}{dt} \quad (9)$$

для различных масс навески черного пороха, представлены на рис. 3. Видно, что в случае стандартной бомбы процесс воспламенения пороха при использовании только электрозапала не соответствует предположению о том, что все зерна пороха поджигаются одновременно и однородно. С увеличением массы черного пороха (2 ÷ 8 г) условия воспламенения приближаются к условиям, соответствующим теорети-

Таблица 1
Описание системы зажигания в опытах в бомбе ОЗС

Система поджига				
А	В1	В2	В3	В4
Только электрозапал (без черного пороха)	Пластиковый пакет с черным порохом массой, г			
	2	4	6	8
Размещение топлива внутри бомбы				
Свободная насыпка		Свободная насыпка		

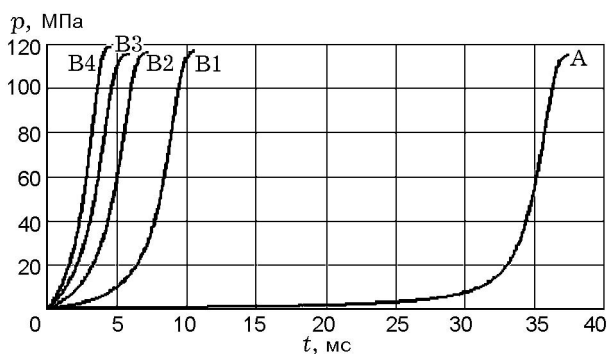


Рис. 2. Изменение давления во времени в экспериментах с бомбой ОЗС при различных (А, В1–В4) системах поджига

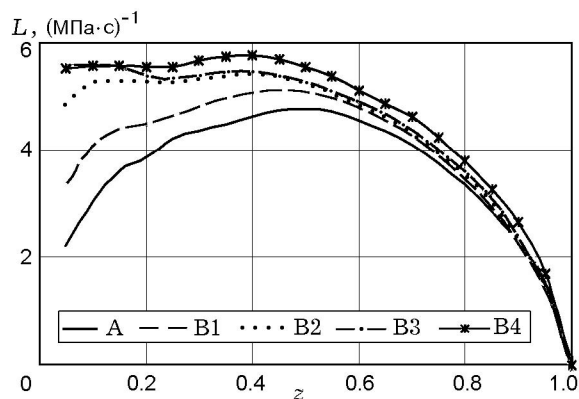


Рис. 3. Интенсивность газообразования $L(z)$ при различных массах навесок черного пороха

ческой модели горения пороха. В экспериментах в стандартной бомбе бóльшая масса черного пороха при одинаковой плотности заряжания дает бóльшую величину энергии, транспортируемой к поверхности пороха в первоначальный период горения топлива, но, к сожалению, эти системы поджига (кривые В1–В4 на рис. 3) и условия заряжания не сопоставимы с теми, что реализуются в реальной оружейной камере. Разработанные методики позволяют сравнить системы воспламенения (тестируемую и стандартную) по таким параметрам, как абсолютная AQ (3) и относительная RQ (4) скорости газообразования и относительная интенсивность газообразования $L_{rel}(z)$, которая определена в [2] как

$$L_{rel}(z) = \frac{\sum_1^m L_{test}(z)}{\sum_1^m L_{std}(z)}, \quad (10)$$

где m — число испытаний.

На рис. 4 приведены зависимости $r_l(p)$, полученные на основе интегрирования по времени кривой давления (5), а на рис. 5 — производной давления по времени (6) для различных масс навески черного пороха (в соответствии с данными табл. 1). Скорости горения могут различаться при одинаковых уровнях давления. Например, при $p = 80$ МПа скорость изменяется в пределах $3.57 \div 5.48$ см/с (линейная аппроксимация (1)) либо $5.75 \div 7.06$ см/с (степенная аппроксимация (2)) в зависимости от массы черного пороха.

Расчетные средние значения импульса давления I_p , относительной интенсивности га-

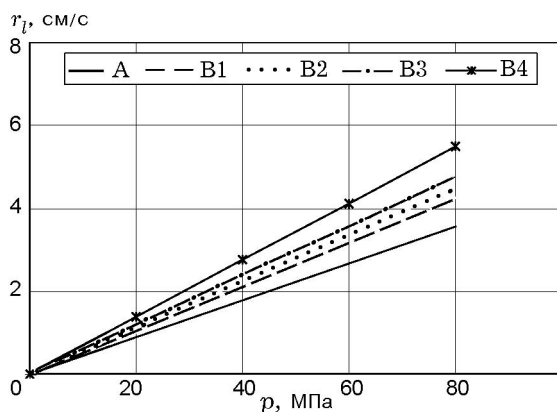


Рис. 4. Скорость горения $r_l(p)$ при использовании различных (А, В1–В4) систем поджига

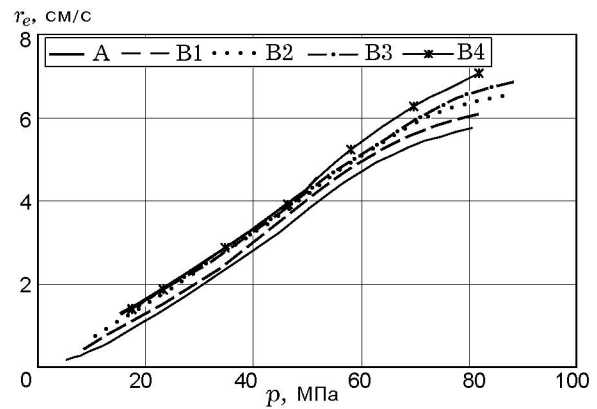


Рис. 5. Скорость горения $r_e(p)$ при использовании различных (А, В1–В4) систем поджига

Таблица 2

Средние значения динамических характеристик горения в бомбе ОЗС

Параметры	Система поджига				
	А	В1	В2	В3	В4
Импульс давления, МПа·с	0.364	0.306	0.290	0.272	0.237
Абсолютный темп прироста давления, ГПа ² /с	1.78	1.95	2.18	2.37	2.63
Относительный темп роста, %	89.6	100	112.1	121.0	134.4
Относительная интенсивность газообразования, %	88.3	100	110.0	117.0	128.8

зообразования $L_{rel}(z)$, абсолютной AQ и относительной RQ скоростей газообразования даны в табл. 2. Видно, что расчетные значения динамических свойств горения порохов различаются.

2.2. Сравнение результатов экспериментов в бомбах ОЗС и МЗС

Экспериментальные исследования того же винтовочного пороха VT были выполнены в ОЗС и МЗС с применением различных методов поджига (табл. 3, методы А, В, С и D) при одинаковой плотности заряжания ($\Delta = 100$ кг/м³).

На рис. 6–9 представлены данные по абсолютной разности давлений $[p - p_{ign}](t)$, а также по динамической интенсивности газообразования $L(z)$ (9) и скорости горения $r(p)$ исследованного пороха. Скорость горения может

Таблица 3

Описание системы зажигания в опытах с бомбами ОЗС и МЗС

ОЗС			МЗС
Система поджига			
А	В	С	D
Только электрозапал (без черного пороха)	Пластиковый пакет с 2 г черного пороха	Пластиковый пакет с 2 г черного пороха	Стандартный капсюль
Размещение топлива внутри бомбы			
Свободная насыпка	Свободная насыпка	Упаковано вместе с черным порохом	Свободная насыпка

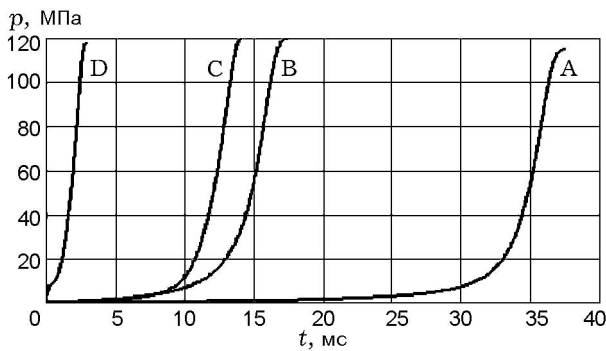
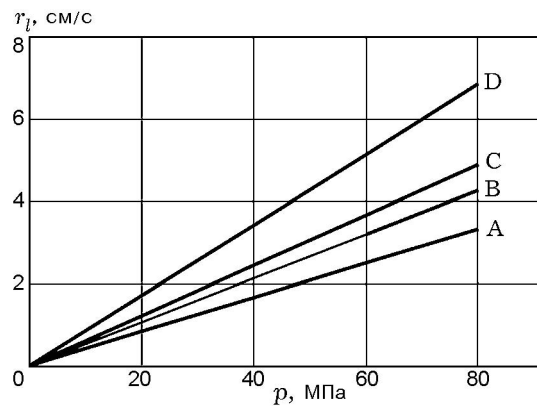
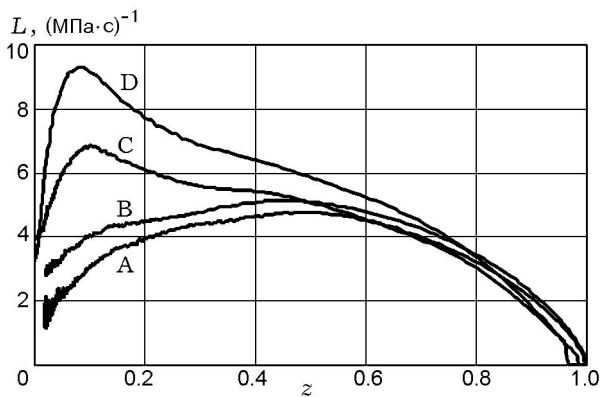
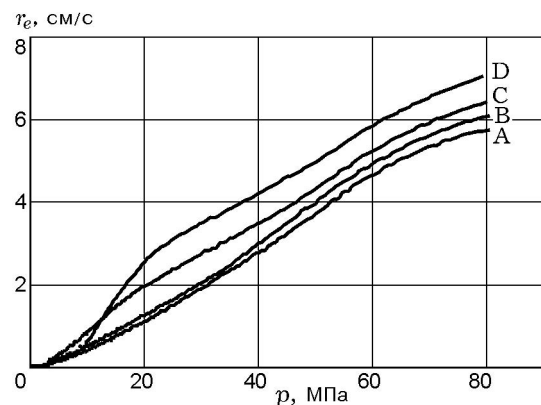


Рис. 6. Зависимости давления от времени в экспериментах в ОЗС/МЗС при различных (А, В, С и D) системах поджига

Рис. 8. Скорость горения $r_l(p)$ при использовании различных (А, В, С и D) систем поджигаРис. 7. Интенсивность газообразования $L(z)$ при использовании различных (А, В, С и D) систем поджигаРис. 9. Скорость горения $r_e(p)$ при использовании различных (А, В, С и D) систем поджига

варьировать при одном и том же уровне давления. Например, при $p = 80$ МПа она изменяется в пределах $3.57 \div 6.84$ см/с (линейная аппроксимация, рис. 8) и $5.75 \div 7.06$ см/с (степенная аппроксимация, рис. 9) в зависимости от используемого метода поджига. Подобное

непропорциональное изменение скорости горения при вариации способа воспламенения наблюдалось при испытаниях в ОЗС (см. рис. 4 и 5).

В экспериментах в МЗС (линии D на рис. 6–9) порох воспламенялся стандартным

капсюлем. Наибольшие значения динамической интенсивности газообразования $L(z)$ и скорости горения r достигнуты при использовании стандартного капсюля от пулеметного патрона.

В табл. 4 приведены результаты расчетов импульса давления I_p , относительной интенсивности газообразования $L_{rel}(z)$ (10), абсолютной AQ (3) и относительной RQ (4) скоростей газообразования, полученные на основе данных по горению пороха. Экспериментально установлено, что динамические характеристики (абсолютные и относительные) горения используемого пороха в бомбе зависят от условий зажигания. Это означает, что коэффициенты a , β и n , а также абсолютная скорость газообразования AQ могут иметь разные значения, если испытания в бомбе одного и того же пороха выполнены с применением различных систем поджига.

Значения коэффициентов в законе скорости горения служат входными данными для проведения расчетов по внутренней баллистике движения снаряда в орудии и для инженерного проектирования ствола. Согласно термодинамической модели внутренней баллистики [1, 14] давление в стволе в значительной мере зависит от коэффициента в законе горения. Была проведена серия расчетов зависимости давление — время для пулемета калибра 7.62 мм, патроны которого были снаряжены винтовочным порохом VT. В расчетах использовались различные значения коэффициента a в законе

Таблица 4
Средние значения динамических характеристик горения в бомбах ОЗС и МЗС

Параметры	ОЗС		МЗС	
	Система поджига			
	А	В	С	Д
Импульс давления, МПа·с	0.392	0.306	0.267	0.190
Абсолютный темп прироста давления, ГПа ² /с	1.78	1.95	2.15	2.36
Относительный темп роста, %	89.6	100	110.5	125.7
Относительная интенсивность газообразования, %	88.3	100	107.8	130.3

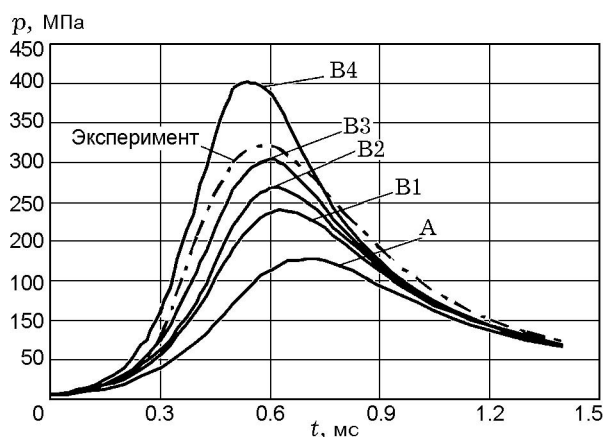


Рис. 10. Зависимости давление — время в стволе пулемета калибра 7.62 мм:

теоретические кривые рассчитаны с использованием коэффициента a , полученного при обработке результатов испытаний в закрытом сосуде с системами поджига А, В1–В4; экспериментальная кривая зарегистрирована в единичном выстреле

скорости горения. Эти значения найдены в результате обработки экспериментальных данных (см. табл. 2), полученных с использованием систем зажигания А, В1, В2, В3 и В4, описанных в табл. 1. Рассчитанные зависимости давление — время приведены на рис. 10 в сравнении с экспериментальной кривой выстрела. Видно, что максимальные давления на расчетных зависимостях различаются и зависят от скорости горения (значения коэффициента a).

Интересно отметить, что теоретическая кривая, построенная с использованием данных, полученных в стандартных условиях испытаний В1 (плотность заряжания, масса черного пороха), существенно отличается от экспериментальной кривой. Подобные результаты получены с использованием значений коэффициента, определенного по результатам испытаний в бомбе с системами зажигания А, В, С и Д (см. табл. 3). Близкое соответствие теоретической и экспериментальной зависимостей может быть достигнуто при использовании либо согласующих внутриваллистических коэффициентов [14], либо истинных значений коэффициента a в законе скорости горения. Истинное значение может быть найдено на основе результатов испытаний в бомбе, проведенных при плотности заряжания и условиях зажигания, подобных таковым в реальной оружейной системе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально показано, что для исследованного мелкозернистого пороха значения коэффициентов в законе горения зависят от способа зажигания при проведении испытаний в закрытом сосуде. В случае экспериментов в стандартных условиях предположение, согласно которому пороховое зерно зажигается мгновенно по всей поверхности и мгновенно устанавливается скорость горения $r(p)$, неверно. Воспламенение — процесс с характерным временем, зависящим не только от плотности заряжения (при одинаковой массе зажигаемого вещества), но и от способа зажигания при данной плотности заряжения. В процессе воспламенения на скорость горения влияют нестационарный процесс перераспределения температуры в прогретом слое топлива и изменение толщины горящего свода. Анализируя нестационарные воздействия на процесс горения пороха, следует учитывать теплообмен продуктов горения со стенками бомбы [16], а также условия теплообмена газов воспламенителя с поверхностью пороховых зерен. На основе стандартных уравнений теплопроводности в конденсированной фазе можно анализировать условия процесса зажигания в виде функции от падающего на поверхность пороха теплового потока, определяемого как количество энергии в единицу времени на единицу поверхности.

Подходы, основанные на уравнении теплопроводности, позволяют описать экспериментально определенное поведение горящего пороха, по крайней мере, упрощенным или качественным способом. Планируются дальнейшие исследования для понимания физических и химических процессов, происходящих во время воспламенения, и для определения условий подобия (относительных характеристик, прежде всего) зажигания и горения порохов с различной формой зерен и различными характеристиками вещества, такими как теплопроводность, плотность и температура пиролиза.

В дополнение отметим, что на основе анализа результатов работ [10, 17–19] по испытаниям в закрытых сосудах при высоких плотностях заряжения представляется вероятным, что данные, полученные в традиционной постановке (при стандартных плотностях заряжения 100 или 200 кг/м³) или в микрососуде типа МЗС, оборудованном специально подобраным капсюлем в качестве системы зажигания, могут служить хорошей основой для опи-

сания реальных значений скорости горения (абсолютных величин) в различные периоды горения мелкозернистого пороха. Можно создать адекватные условия зажигания, и тогда вполне вероятно добиться того, чтобы все пороховые зерна были зажжены однородно и вся поверхность одновременно была бы подвергнута тепловому воздействию. Кроме того, проведенные испытания дают некоторые основания для проектирования сравнительных экспериментов с различными топливами (с различной формой пороховых зерен) при вариации тепловых потоков.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Серебряков М. Е.** Внутренняя баллистика. — М.: Оборонгиз, 1949.
2. **Definition and Determination of Ballistic Properties of Gun Propellants.** — STANAG 4115 LAND (2nd ed.), Military Agency for Standardization. — Brussels, 1997.
3. **Propellants, Solid: Sampling, Examination and Testing.** — ARMY MIL-STD-286 B, U. S. Army Tank — Automotive Command, Armament Research Development and Engineering Center, 1967.
4. **Леонов Г. Н.** Некоторые аспекты механизма влияния пористости конденсированной фазы на горение нитроцеллюлозных порохов // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 44, № 5. — С. 58–63.
5. **Ассовский И. Г., Закиров З. Г., Лейпунский О. И.** О влиянии условий зажигания на горение топлива // Физика горения и взрыва. — 1983. — Т. 19, № 1. — С. 41–46.
6. **Ассовский И. Г., Закиров З. Г., Лейпунский О. И.** О зажигании и горении топлива в потоке излучающего газа // Физика горения и взрыва. — 1986. — Т. 22, № 6. — С. 20–26.
7. **Eisenreich N., Fischer T. S., Langer G., Kelzenberg S., Weiser V.** Burn rate models for gun propellants // Propellants, Explosion, Pyrotechnics. — 2002. — V. 27, N 3. — P. 142–149.
8. **Woodley C., Taylor M., Wheal H.** Boundary layer modelling of the heat transfer process from igniters to energetic materials // Proc. of 23rd Intern. Symp. on Ballistics, Tarragona, Spain. — 2007. — V. I. — P. 295–302.
9. **Baer P. G.** Practical interior ballistic analysis of guns. — New York: AIAA, 1979. — P. 37–66. — (Progress in Astronautics and Aeronautics; V. 66).
10. **Христенко Ю. Ф.** Экспериментальные методы исследования горения зерновых порохов в широком диапазоне изменения параметров процесса // Физика горения и взрыва. — 2001. — Т. 27, № 1. — С. 82–88.

11. **Leciejewski Z. K.** Criticism of linear form of burning rate law with reference to conventional fine-grained propellants // Proc. of VIIth Intern. Armament Conf. SAAT'2008, Pultusk, Poland. — 2008. — P. 191–200.
12. **Leciejewski Z. K.** Experimental study of possibilities for employment of linear form of burning rate law to characterise the burning process of fine-grained propellants // Central Eur. J. of Energetic Materials. — 2008. — V. 5, N 1. — P. 45–61.
13. **Moss G. M., Leeming D. W., Farrer C. L.** Military Ballistics: A Basic Manual. — Shrivenham: Brassey's (UK) Ltd, 1995.
14. **Thermodynamic** Interior Ballistic Model with Global Parameters. — NATO STANAG 4367 Document (2nd ed.), Military Agency for Standardization. — Brussels, 2000.
15. **Serao P., Pierce J.** Sensitivity of ballistic performance to propellant combustion properties. — New York: AIAA, 1979. — P. 259–280. — (Progress in Astronautics and Aeronautics; V. 66).
16. **Хоменко Ю. П., Широков В. М.** Определение нестационарных законов горения пороха на основе манометрических испытаний // Физика горения и взрыва. — 2006. — Т. 42, № 2. — С. 29–38.
17. **Lieb R. J., Rocchio J. J.** The effects of grain fracture on the interior ballistic performance of gun propellants // Proc. of the 8th Intern. Symp. on Ballistics. — Orlando, USA, 1984. — P. I.25–I.34.
18. **Grune D., Hensel D.** Burning behavior of high energy solid propellants in closed vessels at high loading densities // Proc. of the 14th Intern. Symp. on Ballistics. — Quebec, Canada, 1993. — P. 223–229.
19. **Leciejewski Z. K., Surma Z.** Investigation of propellant burning rate in broad range of loading density (in Polish) // Biuletyn WAT (Bulletin of Military University of Technology). — 2008. — V. LVII, N 3. — P. 73–85.

*Поступила в редакцию 15/VIII 2009 г.,
в окончательном варианте — 20/IV 2010 г.*
