ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
Т. 57, № 8/2 ФИЗИКА 2014

УДК 531.57

А.С. ДЬЯЧКОВСКИЙ, В.В. БУРКИН, А.Н. ИЩЕНКО, В.З. КАСИМОВ, Н.М. САМОРОКОВА

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ГОРЕНИЯ МОНОБЛОЧНОГО ТОПЛИВА В МОДЕЛЬНОЙ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР[1]

Предложена методика определения законов горения пороховых и моноблочных топливных зарядов в широком диапазоне начальных температур. Представлена численная обработка экспериментальных данных и показано хорошее согласование экспериментальных и расчетных результатов при использовании полученного закона горения комбинированного заряда.

***Ключевые слова**: моноблочный топливный заряд, начальная температура, скорость горения, баллистическая установка, математическая модель и методика расчета.*

Нетрадиционная схема высокоскоростного метания с использованием так называемого присоединенного заряда (ПЗ) приведена на рис. 1. В этой схеме метательный заряд является комбинированным, состоящим из вышибного порохового заряда, расположенного в задней части пороховой камеры, и подвижного, передний торец которого непосредственно примыкает к метаемому элементу (МЭ) и движущегося вместе с ним. Вышибной заряд предназначен для первоначального ускорения сборки ПЗ+МЭ и создания условий для зажигания ПЗ. ПЗ состоит из пастообразного или твердого моноблочного топлива.

Преимущества использования данной схемы метания по сравнению с классической обусловлены следующими факторами. Во-первых, повышается общая плотность заряжания метательного заряда при обеспечении прогрессивного ввода продуктов сгорания в рабочий объем установки. Во-вторых, горение ПЗ происходит в области МЭ, что приводит к повышению давления на МЭ по сравнению с классической схемой. И, в третьих, МЭ получает дополнительное ускорение за счет реактивной силы, появляющейся из-за оттока продуктов сгорания ПЗ. Вместе с тем схема метания с ПЗ является существенно более сложной, чем классическая, вследствие большего количества заранее неизвестных параметров, связанных с функционированием ПЗ. Поэтому при ее исследовании и отработке применяется комплексный экспериментально-теоретический подход.

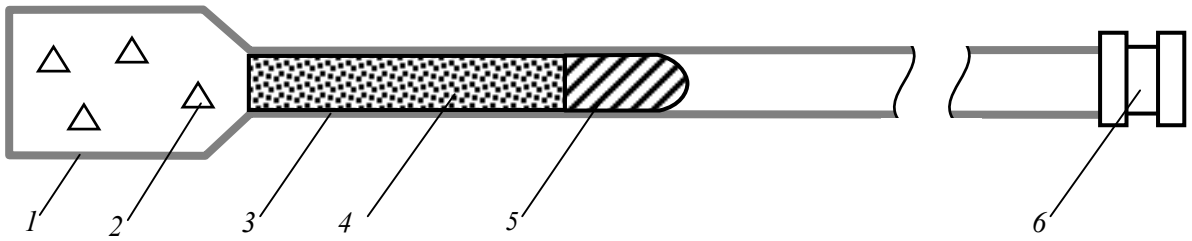

Рис. 1. Схема метания с использованием присоединенного заряда: *1* – камера; *2* – пороховой заряд; *3* – канал БУ; *4* – моноблочный заряд; *5* – МЭ; *6* – датчик дульной скорости (ДДС)

Опыт использования моноблочных и пастообразных зарядов в экспериментах в манометрической бомбе и баллистической установке показывает, что используемое в ПЗ топливо загорается через некоторое время после воспламенения порохового заряда и горит в две стадии. Сначала ПЗ горит в послойном режиме по поверхности, граничащей с пороховыми газами, с низкой скоростью горения U_1, затем скорость горения U_2 быстро возрастает в связи с перестройкой структуры фронта горения в режим ускоренного горения. Критерием перехода от текущей стадии горения на следующую является достижение соответствующих значений импульсов задержки

[1] Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках госзадания № 2014/223 (код проекта 1362).

$$I_1 = \int_0^{t_1} p_д(t)\,dt, \qquad I_2 = \int_0^{t_2} p_д(t)\,dt,$$

где $p_д(t)$ – зависимость давления от времени.

Скорость горения композитных топлив первоначально определяется в условиях манометрической бомбы до давлений порядка 200–350 МПа. Однако условия горения в манометрической бомбе существенно отличаются от условий выстрела как по давлению и плотности заряжания, так и по характеру движения заряда и продуктов сгорания. Поэтому при использовании определенной таким образом скорости горения для расчета процесса метания с использованием ПЗ возникают существенные погрешности в определении скорости МЭ. Эта проблема существует и для классических порохов, а в случае с моноблочными присоединенными зарядами она усиливается из-за сложной динамики топлива, выталкивающего перед собой МЭ. Поэтому необходимо пытаться определить скорость горения моноблочного топлива, используя данные баллистических экспериментов с присоединенным зарядом. В опытах, кроме зависимости давления от времени в сечении датчика давления $P(t)$, фиксируются дульная скорость МЭ $V_д$, а также зависимость скорости МЭ от времени в процессе ускорения в канале БУ $V(t)$.

В качестве модели газодинамических процессов в канале БУ используется разработанная в НИИ ПММ ТГУ математическая модель и соответствующая реализация расчетной методики [1]. В ее основе лежит модель квазиодномерного движения по осесимметричному каналу несущей газовой фазы и частиц. Природа частиц и их количество может быть различными (элементы порохового заряда, составные части ПЗ). На левой границе расчетной области на дне канала БУ ставится граничное условие непротекания. Область, в которой происходит превращение ПЗ в смесь продуктов сгорания и диспергированных конденсированных частиц, имеющую в реальности конечную толщину, в используемой математической модели заменяется поверхностью, на которой ставится граничное условие на правой границе расчетной области, которое условно можно назвать фронтом горения ПЗ. Данное граничное условие, описанное в [1], представляет собой условие на газодинамическом разрыве, справа от которого задаются параметры многокомпонентной газопороховой смеси с известными параметрами, определяющими свойства ПЗ (массовая доля компоненты, степень превращения компоненты в продукты сгорания Ψ, компонента ПЗ характеризуется теми же свойствами, что и элемент порохового заряда), а слева – рассчитываемые параметры в продуктах сгорания.

При этом зависимость скорости фронта горения, распространяющегося по ПЗ, от давления в газе на горящем торце ПЗ p_1 считается известной и задается в виде

$$U_j = A_j p_1^{\nu_j}.$$

Здесь индекс j учитывает тот факт, что реализация расчетной методики позволяет вводить произвольное количество стадий горения ПЗ.

Параметры, определяющие горение топлива, в частности U_1, U_2, I_1, I_2, являются параметрами согласования результатов расчета и эксперимента. Их варьированием достигается возможно более полное совпадение расчетных и экспериментальных значений P_{max}, $V_д$ и формы кривых $P(t)$, $V(t)$.

Кроме этих параметров существенное влияние на протекание внутрибаллистических процессов оказывают скорость горения элементов вышибного порохового заряда в широком диапазоне температур, давление форсирования МЭ, при котором он начинает двигаться, трение МЭ о стенки канала. Поэтому задача определения особенностей горения топлива ПЗ в широком диапазоне температур была разделена на два этапа.

На первом этапе для определения скорости горения элементов вышибного порохового заряда в широком диапазоне температур была проведена серия опытов, в которых в метаемой сборке вместо ПЗ использовался имитатор присоединенного заряда (ИПЗ). Метаемый элемент состоял из текстолитового поддона и запрессованного в него стального маркера. ИПЗ представлял собой полиэтиленовый цилиндр, равный по длине и массе ПЗ. Это достигалось посредством установки на торцевых поверхностях цилиндра стальных маркеров соответствующей массы. Сигналы от маркеров, фиксируемые датчиком дульной скорости (ДДС), позволяют также определить целостность конструкции и положение ИПЗ по отношению к метаемому элементу. Использование ИПЗ, соответствующего реальным геометрическим характеристикам ПЗ, позволяет также воспроизводить

давление форсирования МЭ. На рис. 2 представлен вид метаемой сборки перед установкой в канал БУ с указанием местоположения стальных маркеров.

На рис. 3 представлены осциллограммы сигналов, полученных с ДДС. Зная расположение маркера «1» в МЭ, маркера «2» и «3» в ИПЗ и рассчитав скорость их движения, можно определить наличие или отсутствие отставания ИПЗ от МЭ. Измерив расстояние между маркерами ИПЗ и зная время пролета маркерами одного сечения датчика дульной скорости, можно определить геометрическую целостность метаемой сборки.

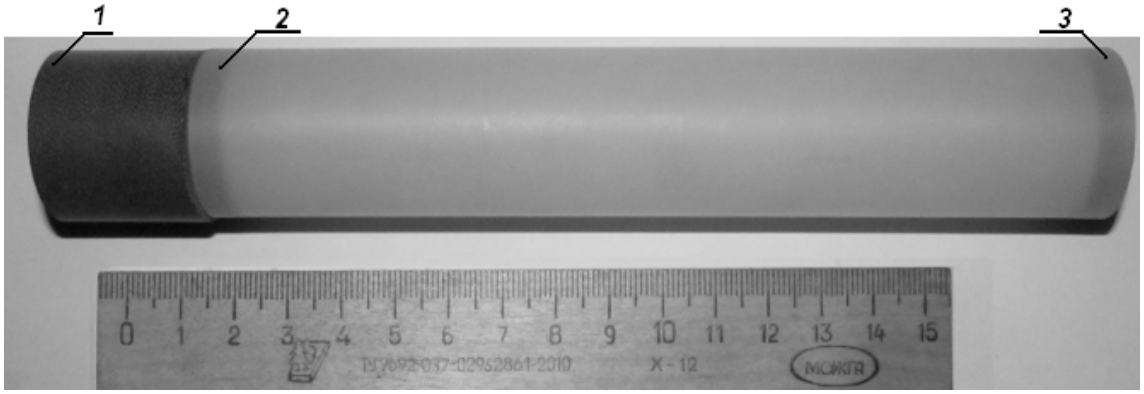

Рис. 2. Внешний вид МЭ вместе с ИПЗ с указанием расположения маркеров (*1*, *2*, *3*)

Представленная на рис. 3 осциллограмма сигнала показывает, что при начальной температуре порохового заряда T_0 = +50 °С ИПЗ не отстает от МЭ. Анализ данных опыта, проводимого при T_0 = –50 °С, показывает аналогичное поведение метаемой сборки. Можно сделать вывод, что в экспериментах с использованием ПЗ в диапазоне температур от –50 до +50 °С не наблюдается отставание ПЗ от метаемого элемента.

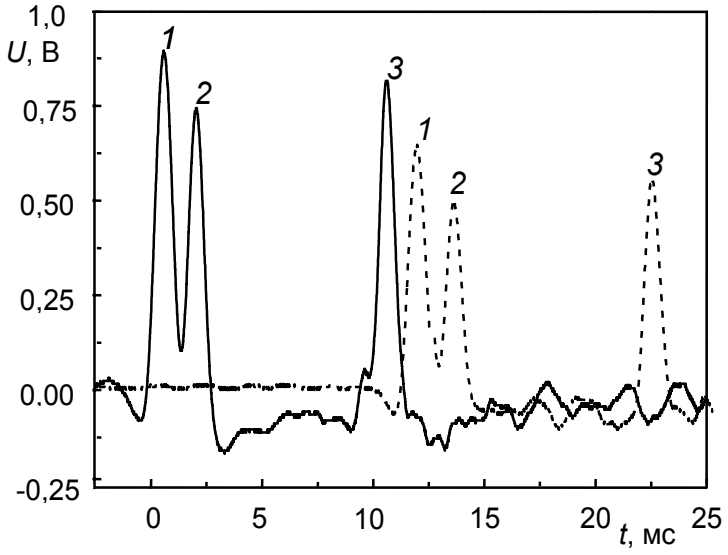

Рис. 3. Осциллограмма сигнала, полученного с ДДС при использовании ИПЗ при температуре заряда +50 °С: ——— – сигнал от первой катушки ДДС; – – – – сигнал от второй катушки ДДС; *1*, *2*, *3* – номера стальных маркеров в составе метаемой сборки

На рис. 4 представлены опытные данные временных диаграмм давления и скорости при начальной температуре заряда –50 °С, полученные при использовании ПЗ и ИПЗ с одинаковыми по массе МЭ и навесками порохового заряда. В экспериментах с начальной температурой заряда +50 °С получены аналогичные данные. Совпадение кривых давления и скорости МЭ в канале БУ на начальном этапе, до начала ускоренного горения ПЗ, позволяет использовать результаты, полученные в опытах с ИПЗ, для описания процессов при использовании ПЗ.

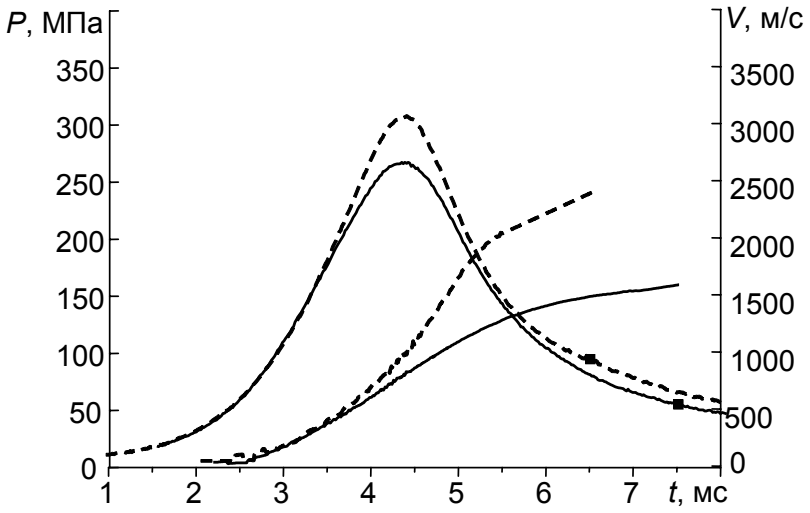

Рис. 4. Временные диаграммы давления и скорости МЭ с использованием ИПЗ и быстрогорящего топлива при начальной температуре заряда –50 °С: ——— – опыт с ИПЗ; – – – – – опыт с ПЗ; ■ – момент вылета тела из канала БУ

В данной серии опытов пороховой заряд состоял из штатного пироксилинового пороха. Для него уточнялась скорость горения u_{st} при стандартной температуре T_{st}. Для начальных температур –50 и +50 °С также производилось уточнение силы пороха и скорости его горения посредством определения θ и β на основе использования известных формул [2, 3]:

$$F = F_{st}[1 + \Theta(T_0 - T_{st})],$$

$$u = u_{st}[1 + \beta(T_0 - T_{st})],$$

где θ – коэффициент, учитывающий влияние начальной температуры на силу пороха; β – коэффициент, учитывающий влияние начальной температуры на скорость горения пороха.

На рис. 5 представлен результат согласования расчетных и экспериментальных данных выстрела с ИПЗ при начальной температуре заряда +20 °С, полученный после уточнения величины u_{st}. Здесь приняты следующие обозначения: P_{max}^{exp}, $P_{max}^{расч}$ – измеренное и вычисленное максимальное давление в камере; $V_д^{exp}, V_д^{расч}$ – измеренная и вычисленная дульная скорость МЭ; ΔP_{max}, $\Delta V_д$ – относительное расхождение измеренных и рассчитанных значений максимального давления и дульной скорости МЭ. Рассогласование расчетных и экспериментальных данных по

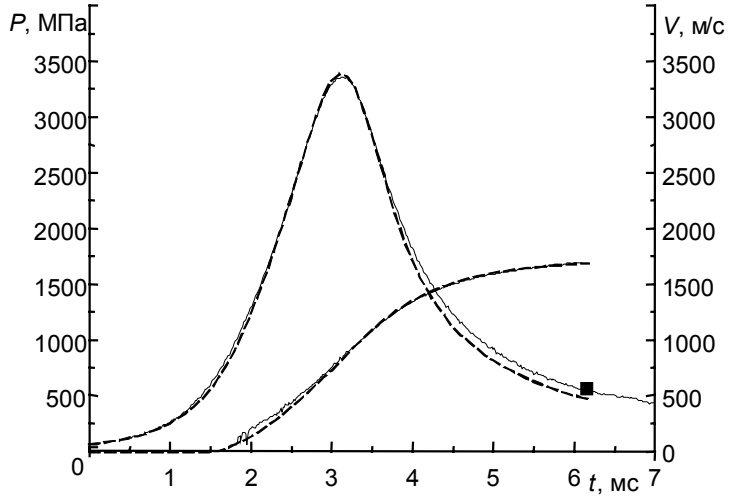

Рис. 5. Временные диаграммы давления и скорости МЭ с использованием ИПЗ при начальной температуре заряда +20 °С: – – – – – расчетная кривая, $P_{max}^{расч}$ = 339.1 МПа, $V_д^{расч}$ = 1695 м/с; ——— – опыт с ИПЗ, P_{max}^{exp} = 336.8 МПа, $V_д^{exp}$ = 1689 м/с; ■ – момент вылета тела из канала БУ; ΔP_{max} = 0.1 %, $\Delta V_д$ = 0.3 %

уровню максимального давления не превышает 0.1 %, по дульной скорости составляет не более 0.3 %.

После определения параметров θ, β рассогласование расчетных и экспериментальных данных при начальной температуре заряда –50 °С по уровню максимального давления не превышало 3.1 %, а по дульной скорости не более 1.0 %. При начальной температуре заряда, равной +50 °С, рассогласование составило по уровню максимального давления не более 4.9 %, по дульной скорости не более 0.9 %.

На втором этапе определялась скорость горения ПЗ в диапазоне температур –50 … +50 °С. Определение основных характеристик горения ПЗ проводилось с учетом диспергирования с поверхности горящего торца ПЗ частиц с заданными величинами объема, поверхности и скорости их послойного горения. При этом для порохового заряда использовались значения температурных коэффициентов, полученных на первом этапе.

Анализ результатов расчетов показал, что в диапазоне температур от –50 до +50 °С ПЗ диспергировался на частицы при прохождении МЭ по каналу БУ расстояния от 3.0 до 2.3м. Диспергированные частицы успевали догореть к моменту вылета МЭ из канала.

Удовлетворительное согласование результатов расчета и экспериментов для начальных температур –50 и +50 °С было достигнуто при значениях $\Psi = 0.2$, степенного показателя скорости горения ПЗ $\nu = 0.8$ и коэффициентов скорости горения ПЗ $A_1 = 0.009$, $A_2 = 0.025$ при использовании системы единиц $M = 1$ г, $L = 1$ см, $T = 1$ мс. На рис. 6 представлены полученные зависимости импульсов задержки I_1, I_2 и линейной скорости горения компоненты ПЗ u от начальной температуры. Из графиков хорошо видно, что с уменьшением начальной температуры заряда наблюдается снижение скорости горения компоненты ПЗ и растет импульс задержки перехода режима горения на следующую стадию.

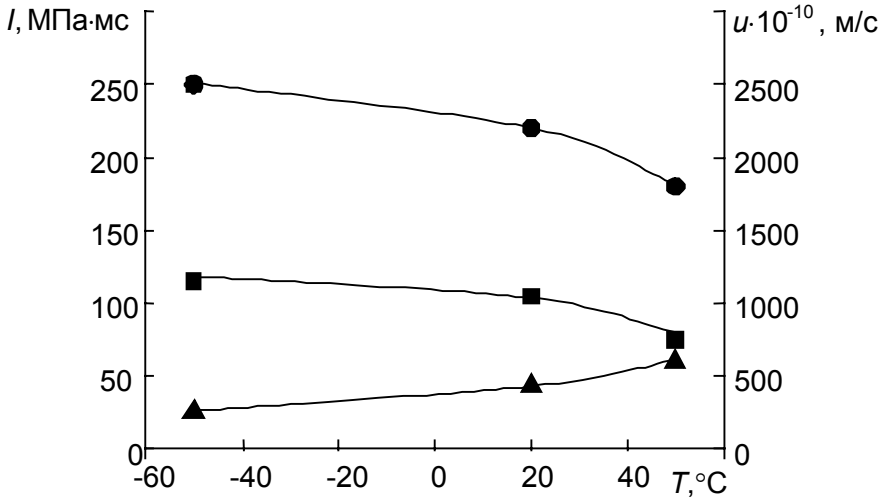

Рис. 6. Зависимости параметров горения ПЗ от начальной температуры: ■ – импульс задержки I_1; ● – импульс задержки I_2; ▲ – линейная скорость горения компоненты ПЗ u

В качестве примера согласования результатов эксперимента на рис. 7 представлены временные диаграммы давления в камере установки и скорости МЭ для начальной температуры комбинированного заряда –50 °С. Видно хорошее совпадение экспериментальных и расчетных зависимостей давления и скорости МЭ в канале БУ от времени. Рассогласование расчетных и экспериментальных данных по уровню максимального давления не превышает 0.4 %, по дульной скорости составляет не более 0.1 %. Для начальной температуры выстрела +50 °С рассогласование расчетных и экспериментальных данных по уровню максимального давления не превышает 0.6 %, по дульной скорости не более 0.4 %.

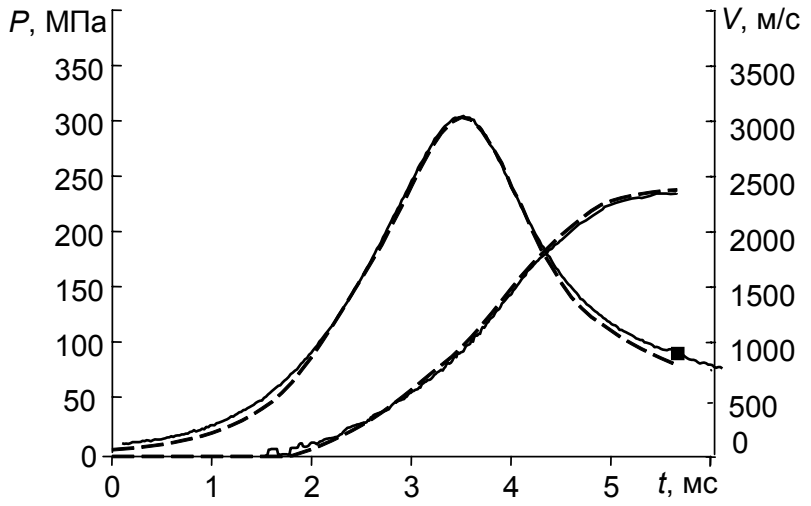

Рис. 7. Временные диаграммы давления и скорости МЭ с использованием быстрогорящего топлива, при начальной температуре заряда –50 °С: – – – – – расчетная кривая $P_{max}^{расч}$ = 309.8 МПа, $V_д^{расч}$ = 2410 м/с; ——— – опыт с ПЗ, P_{max}^{exp} = 308.7 МПа, $V_д^{exp}$ = 2410 м/с; ■ – момент вылета тела из канала БУ; ΔP_{max} = 0.4 %, $\Delta V_д$ = 0.1 %

Таким образом, предложенный в данной работе подход для определения основных характеристик горения присоединенного заряда позволяет достоверно рассчитывать внутрибаллистические параметры метания в широком диапазоне начальных температур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хоменко Ю.П., Ищенко А.Н., Касимов В.З. Математическое моделирование внутрибаллистических процессов в ствольных системах. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 1999. – 256 с.
2. Серебряков М.Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. – М.: Оборонгиз, 1962. – 703 с.
3. Баллистика ствольных систем / под ред. Л.Н. Лысенко, А.М. Липанов. – М.: Машиностроение, 2006. – 461 с.

НИИ прикладной математики и механики Национального исследовательского Томского государственного университета, г. Томск, Россия
E-mail: ichan@niipmm.tsu.ru

Поступила в редакцию 12.09.14.

Дьячковский Алексей Сергеевич, инженер-исследователь;
Буркин Виктор Владимирович, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр., зав. сектором;
Ищенко Александр Николаевич, д.ф.-м.н., зам. директора;
Касимов Владимир Зинатович, д.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;
Саморокова Нина Михайловна, инженер-исследователь.

A.S. DIACHKOVSKY, V.V. BURKIN, A.N. ISHCHENKO, B.Z. KASIMOV, N.M. SAMOROKOVA

INVESTIGATION OF BURNING MONOBLOCK CHARGE IN MODEL BALLISTIC DEVICE AT WIDE RANGE OF INITIAL TEMPERATURE

Based on the data of ballistic experiments method of determining the laws of powder charge burning in a wide range of initial temperatures for throwing scheme with a traveling charge, using the developed mathematical model of gas-dynamic processes in the ballistic facility bore are proposed. Method for determining the laws of rapidly burning fuel combustion consists of two stages. At the first stage the parameters of powder charge are specified by determining the temperature coefficients of the burning rate and the force of gunpowder in the investigated range of initial temperatures. At the second stage, the laws of rapidly burning fuel combustion at the initial charge temperature from –50 to +50 °C. A numerical analysis of the experimental data is presented, good agreement between the experimental and calculated results obtained by using the laws of combustion combined charge and shown. The mismatch between the calculated and experimental data does not exceed the level of the maximum pressure in the combustion chamber of 4.9 %, on the value of the muzzle velocity of the projectile – 0.9 %. The proposed approach in this paper to determine the main characteristics of the associated charge combustion can reliably calculate the parameters of internal ballistics throwing in a wide range of initial temperatures.

Keywords: *monoblock charge, initial temperature, burning velocity, ballistic facility, mathematical model and design procedure.*

REFERENCES

1. Khomenko Y.P., Ishchenko A.N., Kasimov V.Z. *Matematicheskoe modelirovanie vnutriballisticheskikh protsessov v stvolnikh sistemakh* [Mathematical modeling of interior ballistic processes in barrel system]. Novosibirsk, Publishing House of SB RAS, 1999, 256 p.
2. Serbrjakov M.E. *Vnutrennia ballistika stvolnikh system i porokhovykh raket* [Internal ballistics of barrel system and propellant rockets]. Moskow, Oborogiz Publ., 1962, 703 p.
3. Lysenko L.N., Lipanov A.M. (eds.). *Ballistika stvolnikh system*. [Ballistics of barrel system]. Moskow, Engineering Publ., 2006, 461 p.