

А. А. Косточко, П. О. Сафронов, С. А. Скупко

СГЛАЖИВАНИЕ МАНОМЕТРИЧЕСКИХ КРИВЫХ В СООТВЕТСТВИИ С ЗАВИСИМОСТЯМИ, СВЯЗАННЫМИ С СУЩЕСТВОМ РЕШАЕМОЙ ЗАДАЧИ

Ключевые слова: Манометрические исследования, порох, математическое сглаживание, метод наименьших квадратов.

Задачу математического сглаживания экспериментальных зависимостей давления-время, полученных при манометрических испытаниях пороха решает предложенный метод определения скорости горения и зависимости относительной поверхности горения от текущей толщины горящего свода. Вид аппроксимирующей функции выбран из теоретических соображений о природе зависимости. Применен метод наименьших квадратов.

Keywords: Manometric research, gunpowder, mathematical smoothing, the method of least squares.

The problem of mathematical smoothing experimental dependences of pressure-time obtained under manometric trials gunpowder solves the proposed method of determining the rate of burning, and the dependence of relative surface burning from the current thickness of the burning of the code. Type of approximation function is selected from the theoretical considerations about the nature of addiction. There was applied the method of least squares.

Манометрические исследования закономерностей горения порохов преследуют следующие цели: определение и сравнение характеристик горения различных порохов; выяснение влияния рецептурных и технологических факторов на закономерности их горения; использование результатов испытаний при проектировании метательных зарядов и ствольных систем [1]. Непременным условием определения закономерностей горения порохов при испытаниях и использования экспериментально полученных закономерностей для прогнозирования внутрибаллистических характеристик выстрела является превышение уровня максимальных давлений, реализуемых в манометрических сосудах, над уровнем максимальных давлений в артиллерийских системах. Повышенные требования к аппаратуре высокого давления и увеличение трудоемкости испытаний обязывают к поиску новых решений в области аппроксимации опытной зависимости давления от времени и методов определения скорости горения порохов.

Задачу математического сглаживания экспериментальных кривых $p(t)$ решает предложенный [2] метод определения скорости горения и зависимости относительной поверхности горения от текущей толщины горящего свода $\sigma(z)$ по манометрическим опытам в диапазоне плотностей заряжения. Метод предполагает те же допущения, что используются при определении скорости горения известными методами [3, 4]:

- горение происходит параллельными слоями;
- скорость горения является функцией давления $u = a + bp^v$;
- для обрабатываемой серии экспериментов существуют единые зависимости $\sigma(z)$ и $\psi(z)$.

В соответствии с зависимостями, связанными с существом решаемой задачи:

- из физических соображений для скорости горения

$$u = a + bp^v \quad (1)$$

где a, b, v – неизвестные коэффициенты закона скорости горения испытываемого пороха,

- из геометрических соображений для относительной части сгоревшего заряда от текущей толщины горящего свода.

$$\psi_1 = \chi z(1 + \lambda z + \mu z^2) = \frac{z}{1 + \lambda + \mu}(1 + \lambda z + \mu z^2), \quad (2)$$

где λ, μ – неизвестные коэффициенты формы порохового зерна

Относительная толщина горящего свода

$$z = \frac{1}{e_1} \int_0^t u dt = \frac{1}{e_1} \int_0^t (a + bP(t)^v) dt \quad (3)$$

e_1 – половина толщины горящего свода.

Зависимость относительной части сгоревшего заряда ψ от значения давления P , полученного экспериментально для текущего момента

$$\psi_2(t) = \frac{p(t)(W_0 - \frac{w}{\delta} - \alpha_B w_B) - f_B w_B}{\alpha w P(t) - \frac{w}{\delta} P(t) + f w}, \quad (4)$$

где $P(t)$ – давление продуктов сгорания в манометрическом сосуде в момент времени t ; W_0 – объем манометрической бомбы; δ – плотность пороха; α – коэф. к ковалюму продуктов сгорания; α_B – ковалюму продуктов сгорания воспламенителя; f – сила пороха; f_B – сила пороха воспламенителя; w – масса навески; w_B – масса навески воспламенителя.

Значения коэффициентов закона скорости горения – a, b, v и коэффициентов формы порохового зерна – λ, μ определяются из условия минимизации суммы абсолютных разниц значений относительной части сгоревшего заряда $\psi(t)$ в каждой достоверной точке t по зависимостям (3) и экспериментальной кривой (1) одновременно для двух и более экспериментальных зависимостей $p(t)$, полученных при разных плотностях заряжения.

Искомые значения a, b, v, λ, μ также могут определяться из условий минимизации максимального отклонения и минимизации суммы квадратов абсолютных и относительных отклонений.

$$\sum_{i=1}^n (\psi_1 - \psi_2)^2 = \min \quad (5)$$

На стадии программирования возможно исключение или снижение влияния участков кривой $p(t)$ противоречащих физической сущности процесса путем умножения соответствующих отклонений на понижающий коэффициент. Способ минимизации суммы квадратов абсолютных отклонений при решении подобных задач является общепринятым.

Критерием корректной реализации описанного метода является визуальная близость экспериментальных кривых $p(t)$ для каждой плотности заряжения и зависимостей полученных по алгоритму (1)-(3)-(4) после определения коэффициентов a , b , v , λ , μ каким-либо из вышеописанных способов минимизации (рис. 1).

$$P(t) = \frac{f_B w_B + f v \psi(t)}{W_0 - \frac{w}{\delta}(1 - \psi(t)) - \alpha w \psi(t) - \alpha_B w_B} \quad (6)$$

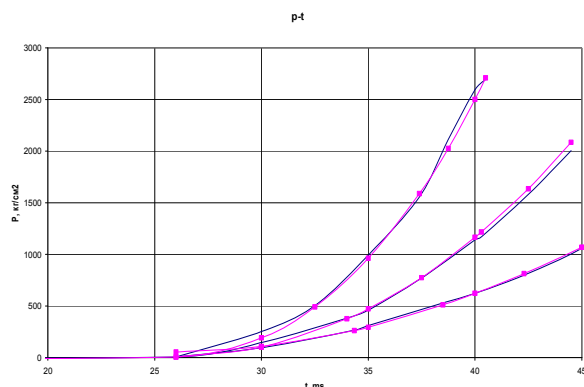


Рис. 1 - Зависимости $P(t)$: экспериментальные и построенные по найденным коэффициентам закона скорости горения – a , b , v и формы порохового зерна – λ , μ (для 3 плотностей заряжения)

Экспериментальные зависимости $P(t)$ получены при испытаниях, разрезанной вдоль для исключения канального эффекта, пороховой трубки в манометрическом сосуде объемом. Расчет проведен без учета тепловых потерь [5, 6].

Зависимости характеризующие изменение формы порохового зерна в процессе горения ($\chi=1,32$; $\lambda=-0,36$; $\mu=0,116$) и закон скорости горения ($u = 0,715 + 0,598 p^{0,76}$) определены описанным методом по трем экспериментальным кривым $p(t)$.

Литература

1. А.В. Косточко, А.А.Косточко, Р.А.Ибрагимов, Е.В. Храмова. Вестник Казанского технологического университета, 15, 24, 54-59 (2012) .
2. А.А.Косточко. В сб. Энергетические конденсированные системы. VI Всероссийская конференция, 14-17 ноября, Черногловка-Дзержинск, 2012, С. 54-57.
3. М.Е. Серебряков. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. Оборонгиз, Москва, 1962, 703с.
4. Ю.П. Хоменко, А.Н. Ищенко, В.З. Касимов. математическое моделирование внутрибаллистических процессов в ствольных системах. Новосибирск, Из-во СО РАН, 1999, 256с.
5. Ю.П. Хоменко, В.М.Широков. Физика горения и взрыва, 42, 2, 29-38 (2006).
6. В.Н.Александров, Б.Д. Диновецкий, С.А. Скупко, П.О. Сафронов. Вестник Казанского технологического университета, 15, 23, 148-151 (2012).