

А. А. Косточко

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИИ НЕОДНОВРЕМЕННОГО ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ПОРОХОВЫХ ЗЕРЕН В МАНОМЕТРИЧЕСКОМ СОСУДЕ

*Ключевые слова: Манометрические исследования, порох, метод наименьших квадратов.*

*Предложена методика определения функции воспламенения навески пороха. Методом наименьших квадратов по результатам манометрических опытам разной плотности заряжания находятся коэффициенты закона скорости горения, общие для каждой плотности заряжания, и коэффициенты функции воспламенения для каждой плотности заряжания.*

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

*The technique of definition of the function of the ignition of the sample powder. Using the least squares method on the results of manometric experimentation with different charge density ratios are law burning rate common to every charge density, and coefficients of functions of ignition for each charge density.*

Выработанное суждение о том, что определенные по результатам манометрических испытаний баллистические характеристики пороха пригодны лишь для сравнительного анализа, не может препятствовать разработке методик расчета, повышающих информативность манометрических данных [1]. При разработке методов определения скорости горения пороха приняты необходимые для их корректной реализации допущения, одним из которых является допущение об одновременном воспламенении всех зерен и о одинаковой форме и размерах пороховых элементов [2, 3]. Если различия в геометрии пороховых зерен могут быть учтены при расчетах, математическое описание явления неодновременного воспламенения представляется более сложной задачей. Определенная методом Вьеля скорость горения отражает процесс постепенного воспламенения, но достоверна в лишь применительно к данным условиям заряжания. Предложенный [4] метод определения скорости горения по опытам разной плотности заряжания позволяет описать фактическое изменение относительной горячей поверхности, определить среднее значение начальной оговоренности порохового зерна при этом «сглаживая» экспериментальную зависимость давления - время. Различия в воспламенении навесок разных плотностей заряжания не могут быть учтены предложенным методом. Однако на основе манометрических опытов разной плотности заряжания могут быть одновременно определены закон скорости горения пороха и скорости воспламенения навесок разных плотностей заряжания (применительно к данным условиям испытаний).

Для описания явления «неодновременного», но последовательного и закономерного воспламенения навески удобно использовать:

$z_B$  - путь, пройденный фронтом горения по толщине горящего свода порохового элемента, воспламенившегося ранее других, к моменту воспламенения всего заряда  $t_{BB}$  (относительная величина);

$\psi_g(t)$  - относительная воспламенившаяся часть заряда

$t_{BB}$  - время, соответствующее воспламене-

нию всего заряда

$u = a p^v + b$  - неизвестная скорость горения пороха

В случае заметного влияния неодновременного воспламенения

$$(z_B + 1)e_1 = \int_0^t u dt;$$

$$z_B e_1 = \int_0^{t_{BB}} u dt;$$

$$\int_0^t u dt - e_1 = \int_0^{t_{BB}} u dt;$$

Допуская равное давление во всем объеме манометрического сосуда [5, 6], считаем скорость перемещения горящего свода равной на поверхностях всех воспламенившихся к этому времени пороховых элементов.

Относительная сгоревшая часть заряда  $\psi(t)$  к моменту времени  $t$ ,

$$\psi(t) = \int_0^{t_{BB}} \frac{d\psi_B}{dt_B} \psi(z) dt_g = \int_0^{t_{BB}} \frac{d\psi_B}{dt_B} \psi \left( \int_{t_g}^t \frac{1}{e_1} u(p) dt \right) dt_g$$

$$\text{(если } t \geq t_{BB}, t_{BB} = t)$$
 (1)

где  $\psi_g(z)$  - относительная воспламенившаяся часть заряда;

$z$  - текущая относительная толщина горящего свода порохового зерна в момент  $t$ , воспламенившегося в момент времени  $t_B$

$$z(t) = \int_{t_B}^t \frac{1}{e_1} u(p) dt \quad \text{(если } z > 1, z = 1)$$

Относительная сгоревшая часть этого же порохового зерна

$$\psi(z) = \chi z (1 + \lambda z + \mu z^2);$$

$\chi, \lambda, \mu$  - известные коэффициенты формы порохового зерна.

Для определения, необходимо выработать суждения о свойствах этой функции исходя из физической сущности процесса.

В начале процесса  $t = 0$ ;  $\psi_e(t) = 0$ ;

к моменту полного воспламенения  $\psi_e(t) = 1$ , значение  $t_{\text{ВВ}}$  связано выражением

$$\int_0^t u dt - e_1 = \int_0^{t_{\text{ВВ}}} u dt,$$

Представив в виде  $\psi_e(t) = \theta t + \beta t^2$ , преобразуем до:

$$\psi_e(t) = \theta t + \beta t^2 = \frac{t}{t_{\text{ВВ}}} + \beta t (t - t_{\text{ВВ}}) \quad (2)$$

Имея опытные зависимости  $p(t)$ , полученные при разных плотностях заряжения, экспериментальные зависимости  $\psi(t)$  – относительной части сгоревшего заряда от времени могут быть представлены в виде:

$$\psi(t) = \frac{P(t)(W - \frac{w}{\delta} - \alpha_e w_e) - f_e w_e}{\alpha w P(t) - \frac{w}{\delta} P(t) + fw} \quad (3)$$

где  $P(t)$  – давление продуктов сгорания в манометрическом сосуде в момент времени  $t$

$W_0$  – объем манометрической бомбы

$\delta$  – плотность пороха

$\alpha$  – коэффциентом продуктов сгорания

$\alpha_e$  – коэффциентом продуктов сгорания воспламенителя

$f$  – сила пороха

$f_e$  – сила пороха воспламенителя

$w$  – масса навески

$w_e$  – масса навески воспламенителя

Значения коэффциентов закона скорости горения –  $a, b, \nu$  (единицы для манометрических опытов нескольких плотностей заряжения) и коэф-

фициентов  $\beta$ , с помощью которого описаны зависимости относительной воспламенившейся части заряда от времени  $\psi_e(t)$  для каждой плотности заряжения, определяются из условия минимизации суммы квадратов отклонений значений относительной части сгоревшего заряда  $\psi(t)$  в каждой достоверной точке  $t$  по зависимостям (1) и экспериментальной кривой (2) для двух и более кривых  $p(t)$ , полученных при разных плотностях заряжения.

$$P(t) = \frac{f_e w_e + fw \psi(t)}{W_0 - \frac{w}{\delta} (1 - \psi(t)) - \alpha w \psi(t) - \alpha_e w_e} \quad (4)$$

Критерием корректной реализации этого метода является визуальная близость экспериментальных кривых  $p(t)$  для каждой плотности заряжения и зависимостей  $p(t)$  полученных в последовательности (2)-(1)-(4) после определения коэффциентов  $a, b, \nu, \beta$  вышеописанным способом минимизации.

## Литература

1. А.В. Косточко, А.А.Косточко, Р.А.Ибрагимов, Е.В. Храмова. Вестник Казанского технологического университета, 15, 24, 54-59 (2012).
2. М.Е. Серебряков. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. Оборонгиз, Москва, 1962, 703с.
3. Ю.П. Хоменко, А.Н. Ищенко, В.З. Касимов. математическое моделирование внутрибаллистических процессов в ствольных системах. Новосибирск, Из-во СО РАН, 1999, 256с.
4. А.А.Косточко. В сб. Энергетические конденсированные системы. VI Всероссийская конференция, 14-17 ноября, Черноголовка-Дзержинск, 2012, С. 54-57.
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).