

# Метрологія та вимірювальна техніка

УДК 623.51

О.А. Александров

Академія внутрішніх військ МВС України, Харків

## РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ДАТЧИКА ТИСКУ ПОРОХОВИХ ГАЗІВ У КАНАЛАХ СТВОЛІВ СТРІЛЕЦЬКОЇ ЗБРОЇ

*Обґрунтовано потребу розроблення методики експериментального дослідження датчика тиску порохів газів в каналах стволів стрілецької зброї. Запропоновано методику проведення експериментальних досліджень датчика тиску порохів газів в каналах стволів стрілецької зброї, що дозволяє перевірити адекватність математичної моделі датчика тиску.*

**Ключові слова:** математична модель, методика проведення експериментальних досліджень, датчик тиску, балістичний пристрій.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Характеристики, тактико-технічні властивості нових зразків стрілецької зброї, зразків зброї, що приймаються від виробників, технічний стан зброї, що знаходиться в експлуатації, чи приймається з довготривалого зберігання підрозділами та частинами внутрішніх військ МВС України, визначається вимірюванням параметрів внутрішньобалістичних процесів. До них відносяться початкова швидкість кулі та характер зміни тиску в каналі ствола. Для більшості вимірювань початкової швидкості кулі використовують закордонні засоби з відомими метрологічними характеристиками, що відповідають державним стандартам. Але для спеціалізованих засобів вимірювання тиску державними стандартами передбачено визначення тільки статичних характеристик.

Проте, як зазначено в роботах [1, 2], для отримання детальної інформації про внутрішньобалістичні процеси необхідно враховувати динамічні характеристики датчика тиску. Вказано, що внутрішньобалістичні процеси можна дослідити на основі математичного моделювання датчика тиску в каналі ствола стрілецької зброї [3].

Підтвердження результатів математичного моделювання датчика тиску потребує проведення низки експериментальних досліджень. В ході досліджень необхідно порівняти результати вимірювання кривої зміни тиску в каналі ствола під час проведення експерименту з результатами її математичного моделювання.

Таким чином виникає необхідність систематизації та поєднання у методику таких процесів, як експериментальні дослідження засобу вимірювання кривої тиску, отримання обсягів вимірювальної інформації, достатніх для перевірки адекватності

отриманих теоретичним шляхом динамічних характеристик засобу вимірювання і статистичної обробки результатів вимірювань.

**Аналіз публікацій.** Найбільш відомі аналітичні методи [1 – 3], за допомогою яких можна отримати закон зміни тиску з часом. Більшість значимих параметрів при найменшій кількості допущень враховано в методі професора Дроздова Н.Ф. При використанні математичного апарату, покладеного в основу вказаного методу, можна уникнути етапу побудови та використання спеціальних таблиць та отримати математичну модель вхідного сигналу в аналітичному вигляді.

Зв'язок характеристик вихідного сигналу датчика тиску з параметрами його передаточної функції та характеристиками вхідного сигналу розглядається в роботі [4]. Але в цій роботі не даються рекомендації зі способів оброблення результатів експериментальних даних. Це не дає змоги оцінити відповідність результатів експериментальних досліджень датчика тиску результатам його математичного моделювання.

**Метою статті** є розроблення методики проведення експериментальних досліджень датчика тиску порохів газів в каналі ствола стрілецької.

### Викладення основного матеріалу

Методика проведення експериментальних досліджень поділяється на наступні періоди:

1. Виконання теоретичних розрахунків кривих тиску для зброї та боєприпасів з задалегідь відомими сукупностями параметрів. В результаті теоретичних розрахунків отримуються сукупності теоретичних кривих вихідного сигналу датчика тиску порохів газів у каналі ствола за допомогою математичних моделей вхідного сигналу і датчика тиску для відомих сукупностей параметрів зразка стрі-

лецької зброї, патрону, фізичних та геометричних параметрів датчика тиску, що досліджується.

2. Підготовка до отримання експериментальних кривих тиску під час стрільб, що включає обрання необхідної кількості та типів патронів, вимірювання їх параметрів, підготовка датчика тиску та вимірювальної апаратури. До параметрів патрону відносяться маса кулі, маса, марка порохового заряду та форма зерен пороху. Під підготовкою датчика тиску розуміється закріплення його на зброї та вимірювання його геометричних розмірів. Підготовка вимірювальної апаратури полягає у під'єднанні датчика тиску до електронно-обчислювального пристрою за допомогою аналого-цифрового перетворювача.

3. Отримання експериментальних кривих тиску при проведенні стрільб зі зразка стрілецької зброї та патрону із відомими параметрами. Під час проведення пострілів зі зброї, на якій закріплено датчика тиску, відбувається фіксація кривої зміни тиску за допомогою аналого-цифрового перетворювача та електронно-обчислювального пристрою. Далі проводиться повторення випробовувань необхідну кількість разів для виключення впливу випадкових факторів.

4. Оброблення експериментальних даних та теоретичних розрахунків кривих тиску для заданих сукупностей параметрів полягає у застосуванні ме-

тодів аналізу експериментальних даних використовуючи результати порівняння вихідного сигналу, одержаного експериментально, з результатами математичного моделювання кривої тиску.

Розглянемо більш детально наведені періоди. Кожний зразок озброєння та боеприпасів характеризується сукупністю фізичних та геометричних параметрів. За цими параметрами проводиться математичне моделювання кривих зміни тиску з часом на основі відомої математичної моделі вхідного сигналу [4] та математичної моделі датчика тиску [3].

За основу візьмемо відому будову датчика тиску [5], який складається з корпусу, порожнини, заповненої термоізолюючою рідиною, у якій розташовано тензометричний чутливий елемент. У корпусі виконано приймальний канал, через який вимірюваний тиск діє на мембрану. Мембрана притискається до корпусу зсередини порожнини за допомогою затискної гайки і забезпечує передавання тиску до термоізолюючої рідини і тензометричних чутливих елементів.

Згідно з відомими принципами побудови вимірювальних приладів прямого перетворення датчик тиску [4] можна подати у вигляді послідовного з'єднання кількох елементарних перетворювачів, властивості яких визначаються їх передаточними функціями  $W_i(s)$  (рис. 1).

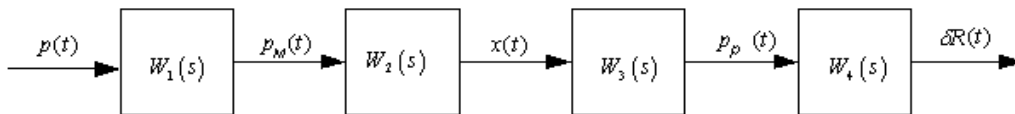


Рис. 1. Структурна схема датчика МЗТ

На рис. 1 подано такі елементарні перетворювачі:  $W_1(s)$  – газова субстанція, що заповнює приймальний канал й обмежена каналом ствола з одного боку і мембраною – з іншого.

Вхідною величиною перетворювача є вимірюваний тиск порохових газів  $p(t)$ , вихідною  $p_m(t)$  – тиск шару газу, що безпосередньо контактує з мембраною;  $W_2(s)$  – мембрана датчика тиску. Вихідним сигналом є переміщення центральної точки мембрани  $x(t)$ , зумовлене тиском шару газу, що безпосередньо контактує з мембраною;  $W_3(s)$  – термоізолююча рідина, що заповнює внутрішній об'єм датчика. Вихідним сигналом є тиск  $p_p(t)$  рідини на тензорезистор;  $W_4(s)$  – тензометричний чутливий елемент. Вихідним сигналом є відносна зміна електричного опору  $\delta R(t)$ , зумовлена обтискуванням тензорезистора рідиною.

Математична модель датчика тиску представляє собою послідовність елементарних перетворювачів, які визначаються фізичними та геометричними параметрами датчика тиску [3]. Математична

модель датчика тиску є добутком передаточних функцій елементарних перетворювачів

$$W(s) = e^{-\tau_3 s} \frac{1}{T_H s + 1} \frac{k_M}{T_M^2 s^2 + 2\xi_M T_M s + 1} X; \quad (1)$$

$$\frac{k_p}{T_p^2 s^2 + 2\xi_p T_p s + 1} K,$$

де  $\tau_3$  – час запізнення розповсюдження тиску в першому елементарному перетворювачі, який залежить від геометричних розмірів та модуля пружності матеріалу приймального каналу, а також характеристик газової субстанції, що його заповнює;  $k_M$ ,  $T_M$ ,  $\xi_M$  – коефіцієнт передачі, постійна часу та параметр затухання мембрани, які визначаються її геометричними розмірами, масою, жорсткістю, модулем пружності, коефіцієнтом внутрішнього тертя та коефіцієнтом Пуассона матеріалу мембрани;  $k_p$ ,  $T_p$ ,  $\xi_p$  – коефіцієнт передачі, постійна часу та параметр затухання рідини, що залежать від її стискуваності, кінематичної в'язкості та густини, а також геометричних розмірів порожнини;  $K$  – тензометричний коефіцієнт матеріалу чутливого елемента.

Користуючись передаточною функцією датчика з відомими параметрами змодельовано вихідний сигнал датчика тиску на основі існуючої математичної моделі вхідного сигналу – зміни тиску з часом в каналі ствола, що враховує параметри заряджання, патрону та каналу ствола [4].

Для змодельованих кривих зміни тиску з часом в каналі ствола за допомогою математичної моделі датчика тиску дістанемо вихідний сигнал датчика [4].

Моделю вхідного сигналу датчика побудована на основі розв'язання рівнянь, що зв'язують тиск  $p(x)$  у каналі ствола, час  $t$  з моменту початку руху кулі до моменту досягнення нею координати  $x$  упродовж каналу ствола та швидкості кулі  $v(x)$ :

$$p(x) = \frac{\eta \cdot f}{s} \frac{\psi - \frac{B \cdot \theta}{2} x^2}{I_\psi(x)};$$

$$v(x) = v_{пр} \sqrt{1 - \left(\frac{x + l_k}{x + l_x}\right) \cdot \left(1 - \frac{v_k^2}{v_{пр}^2}\right)};$$

$$t = \frac{2l_x}{v} + \int \frac{dl}{v}.$$

де  $I_\psi(x)$  – залежність кількості пороху, що залишилась при проходженні кулею шляху  $x$  у каналі ствола;  $v_{пр}$ ,  $v_k$  – відповідно приведена та максимальна швидкість кулі;  $l_x$  – довжина казенної частини ствола. Конструктивні особливості ствола зброї: об'єм камори  $W_0$ , площа перетину каналу ствола (включно з нарізами)  $s$ , довжина шляху снаряду по каналу  $l_d$ ; конструктивні особливості кулі: маса кулі  $q$ , тиск форсування  $p_0$ ; маса заряду пороху  $\eta$ ; сила пороху  $f$ ; координата ділянки ствола  $x$ ; частина заряду  $\psi$ , що згорає до початку руху кулі; параметр Дроздова  $B$ ; газова стала  $\theta$ .

Розв'язок системи (2) у вигляді залежності тиску в каналі ствола від часу з моменту початку руху кулі може бути отриманий як аналітичним шляхом, так і чисельно. Оскільки рішення системи (2) у подальшому підлягатиме інтегруванню, доцільне його подання у вигляді полінома:

$$p(t) = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + \dots + a_{n-1} \cdot t^{n-1}, \quad (3)$$

де  $n$  – кількість розв'язків системи (2);  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_{n-1}$  – коефіцієнти, значення яких залежать від параметрів заряджання та геометричних параметрів каналу ствола.

Використовуючи дані про зброю на основі математичної моделі вхідного сигналу будуємо теоретичну криву тиску. Експериментальні дані про зміну тиску в каналі ствола отримуємо під час проведення вимірювань вихідного сигналу датчика тиску. За допомогою математичної моделі датчика тиску

отримуємо теоретичну криву тиску для оброблення разом з експериментальними кривими тиску.

Оброблення експериментальних даних відбувається наступним чином. Визначаються відносні відхилення  $\delta_{exp}$  кожного миттєвого значення теоретичної кривої тиску  $p(i)$  з отриманою експериментально  $p_{exp}(i)$  у відповідності до виразу (4)

$$\delta_{exp}(i) = \frac{|p_{exp}(i) - p(i)|}{p(i)} \cdot 100\%, \quad (4)$$

де  $i$  – номер відліку.

Розраховуються середні значення відносних відхилень  $\bar{\delta}_{exp}$  у відповідності до виразу

$$\bar{\delta}_{exp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta_{exp}(i). \quad (5)$$

Оцінюється середнє квадратичне відхилення  $\delta_{exp}$  максимального відносного відхилення  $\delta_{exp}(i)$  у відповідності до виразу (6) [6]

$$\sigma_{exp} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\delta_{exp}(i) - \bar{\delta}_{exp})^2}. \quad (6)$$

В якості приклада наведемо результати математичного моделювання теоретичних кривих зміни тиску з часом для п'яти різних сукупностей параметрів мисливських боєприпасів 12 калібру для рушниці ТОЗ-34 (рис. 2).

Змінюючи типи набоїв, що відрізняються масою порохового заряду, масою патрону та типом пороху отримано експериментальні криві тиску. Проведено їх порівняння з кривими, одержаними за допомогою математичних моделей датчика тиску та кривої зміни тиску для обраної зброї та набоїв.

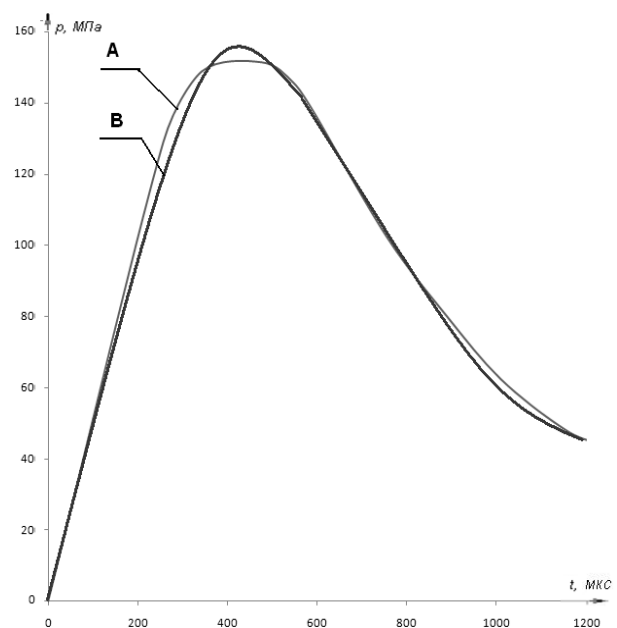


Рис. 2. Результат теоретичного розрахунку кривої  $p(t)$  (крива А) для певної сукупності параметрів в порівнянні з результатами експерименту (крива В)

Максимальне відносне відхилення  $\delta_{\text{exp}}$  кожного миттєвого значення кривої тиску для найбільш характерних сукупностей параметрів подано на рис. 3.

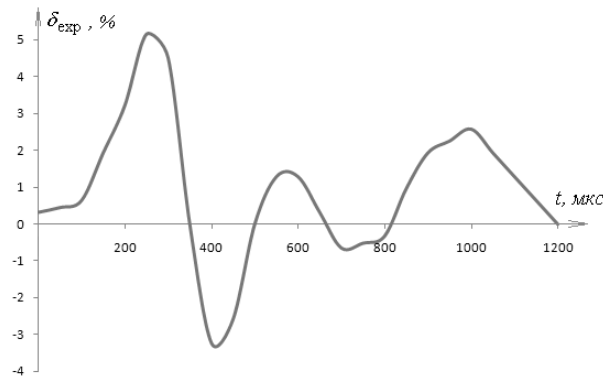


Рис. 3. Відносне відхилення  $\delta_{\text{exp}}$  отриманих експериментально та розрахованих теоретично тиску

Середнє відносне відхилення теоретичного значення тиску від отриманого експериментально у відповідності до виразу (3)  $\bar{\delta}_{\text{exp}} = 1,59\%$ .

Аналіз отриманих результатів показує, що для всіх сполучень параметрів тривалість перехідних процесів для експериментально отриманих кривих тиску та теоретичних кривих тиску співпадають з точністю до 6%. Для кожної з отриманих пар кривих тиску середнє значення максимального відносного відхилення  $\bar{\delta}_{\text{exp}}$  до 5,5%.

Для задач піродинаміки неспівпадіння результатів експерименту з результатами математичного моделювання 15...10% є прийнятним [6].

## Висновки

Наведена методика дозволяє оцінити відповідність результатів експериментальних досліджень датчика тиску результатам його математичного моделювання.

Також вона дає змогу проводити аналіз вказаних результатів для сукупностей параметрів без здійснення багаторазових повторень експериментальних випробувань для кожної заданої сукупності параметрів.

## Список літератури

1. Голомбовский А.К. Теория и расчёт автоматического оружия [Текст] / А.К. Голомбовский – Пенза: ПВАИУ, 1973. – 493 с.
2. Крюков О.М. Проблемы вимірювального контролю параметрів внутрішньобалістичних процесів [Текст] / О.М. Крюков, О.А. Александров // Честь і закон. – Х.: АВВ МВС України. – № 2. – 2009. – С. 79-89.
3. Крюков О.М. Математична модель датчика для вимірювання миттєвих значень тиску в каналах стволів стрілецької зброї [Текст] / О.М. Крюков, О.А. Александров // Свобода озброєння та військова техніка. – Х.: ХУПС. – № 4(24). – 2010. – С. 83-89.
4. Крюков О.М. Розробка та математичне моделювання засобу вимірювання імпульсного тиску в каналах стволів стрілецької зброї: [Текст] / О.М. Крюков, О.А. Александров // Електротехнічні і комп'ютерні системи. – Одеса: Одеський технічний університет, 2012. – С. 24-38.
5. Пат. 53153 Україна, МПК G 01 L 23/00. Датчик миттєвих значень тиску / Крюков О.М., Біленко О.І., Александров О.А.; заявники та власники прав Крюков О.М., Біленко О.І., Александров О.А.; заявл. 01.04.10; опубл. 27.09.10, Бюл. № 18.
6. Бурдун Г.Д. Основы метрологии [Текст] / Г.Д. Бурдун, Б.Н. Марков – М.: Издательство стандартов, 1985. – 256 с.

Надійшла до редколегії 22.02.2013

Рецензент: д-р військ. наук, проф. Г.А. Дробаха, Академія внутрішніх військ МВС України, Харків.

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ ПОРОХОВЫХ ГАЗОВ В КАНАЛАХ СТВОЛОВ СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ

А.А. Александров

Проведена оцінка впливу температури порохових газів і електричного тока источника питания на исходящий сигнал тензорезисторного датчика измерения давления в каналах стволов стрелкового оружия. Получена математическая модель температурной погрешности. Предложен способ уменьшения влияния температурной погрешности на результат измерения давления.

**Ключевые слова:** математическая модель, методика проведения экспериментальных исследований, датчик давления, баллистическое устройство.

## THE DEVELOPMENT OF THE EXPERIMENTAL INVESTIGATION METHODS OF THE POWDER GAS PRESSURE SENSORS IN THE BARRELS OF SMALL ARMS

O.A. Aleksandrov

The need to develop methods of pressure sensor experimental investigation has been proved. The method of experimental studies gauge pressure of powder gases in the barrel firearms, which allows checking the adequacy of the mathematical model of pressure sensor, has been proposed.

**Keywords:** mathematical model, method of conducting of experimental researches, sensor of pressure, ballistic device.