

УДК 623.51

**О. М. Крюков**, д-р техн. наук,  
**О. А. Александров**

### **РОЗРОБКА ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ІМПУЛЬСНОГО ТИСКУ В КАНАЛАХ СТВОЛІВ СТРІЛЕЦЬКОЇ ЗБРОЇ**

*Обґрунтовано конструкцію дослідної установки для вимірювання миттєвих значень тиску в каналах стволів стрілецької зброї. Запропоновано математичні моделі датчика тиску та його динамічної похибки. Практично підтверджено працездатність експериментального засобу вимірювання миттєвих значень тиску.*

**Ключові слова:** дослідна установка, датчик миттєвих значень тиску, динамічна похибка

**A. M. Kryukov**, ScD.,  
**A. A. Aleksandrov**

### **DEVELOPMENT AND MATHEMATICAL MODELLING OF THE DEVICE FOR IMPULS PRESSURE MEASURING IN THE BARREL OF SMALL ARMS**

*The construction of the experimental device for measuring the impulse pressure in the bore of small arms has been justified. Mathematical model of the pressure sensor and dynamic error have been proposed. The efficiency of the impulse pressure device has been confirmed.*

**Keywords:** experimental device, the impulse pressure sensor, the dynamic error

**A. M. Крюков**, д-р техн. наук,  
**A. А. Александров**

### **РАЗРАБОТКА И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ДАВЛЕНИЯ В КАНАЛАХ СТВОЛОВ СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ**

*Обосновано конструкцію експериментальної установки для вимірювання миттєвих значень тиску в каналах стволів стрілецької зброї. Предложено математические модели датчика давления и его динамической погрешности. Практически подтверждена работоспособность экспериментального средства измерения миттєвих значень тиску.*

**Ключевые слова:** экспериментальная установка, датчик миттєвих значень тиску, динамическая погрешность

**Постановка проблеми.** Характеристики і тактико-технічні властивості будь-якого зразка зброї значною мірою визначаються характером протікання внутрішньобалістичних процесів і, зокрема, законом зміни тиску порохових газів у каналі ствола та їх дією на всі частини і елементи, що використовують енергію порохових газів. Таким чином, для успішного проектування та модернізації зброї, обґрунтування конструкції стволів, частин та механізмів, оптимізації роботи двигунів автоматики, а також для дослідження порохів з метою визначення їх сили, швидкості і закону горіння потрібно мати точні відомості про закон зміни тиску в каналі ствола.

**Аналіз публікацій.** Сучасна практика висуває досить високі вимоги до точності визначення миттєвих значень тиску в каналі ствола. Так, межа допустимої відносної похибки визначення цієї фізичної величини

будь-якими методами і засобами має не перевищувати 1–2 % при застосуванні вимірювальної інформації для розрахунку конструкції ствола, 2–4 % – для розрахунку частин та механізмів зброї, що використовують енергію порохових газів [2, 4, 5].

Застосування відомого крешерного методу та відповідних засобів [5] має суттєві обмеження, оскільки дає змогу фіксувати лише максимальне значення тиску в каналі ствола, крім того, точність цього методу обмежена інерційними властивостями елементів конструкції крешерного пристрою та таруванням крешерних циліндрів у статичному режимі.

Сучасні засоби вимірювання тиску, в основу яких покладено п'єзоелектричний, тензOMETричний, частотний та оптичний методи, широко використовуються в промисловості [8] для визначення швидкозмінного тиску в середовищах з високою температурою та в умовах швидкого розширення газів (напри-

клад у котлових об'єктах, двигунах внутрішнього згорання тощо).

Проте умови вимірювання тиску в каналі ствола суттєво відрізняються від умов, які визначають сферу застосування відомих засобів вимірювання імпульсного тиску. Специфіка сприйняття, передавання та обробки виміральної інформації зумовлена як високою верхньою межею діапазону вимірювання (до 400 МПа) та малою тривалістю явища пострілу (до 0,003 с), так і екстремальними значеннями впливних величин (наприклад, високою температурою порохових газів, яка може сягати декількох тисяч градусів Цельсія). Тому створення спеціалізованого засобу вимірювання тиску в каналі ствола є складним науково-технічним завданням.

**Мета статті.** Метою роботи є обґрунтування шляхів побудови та математичне моделювання засобу вимірювання миттєвих значень тиску в каналі ствола, а також експериментальне дослідження особливостей технічної реалізації сприйняття виміральної інформації.

**Викладення основного матеріалу.** Аналіз джерел інформації [4, 5, 8] показав, що прийнятну точність вимірювання може забезпечити тензOMETричний метод, який водночас є порівняно простим у реалізації. Реалізація цього методу передбачає застосування датчика імпульсного тиску, що перетворює деформацію тензOMETричного чутливого елемента в електричний сигнал, який реєструється у вигляді шуканої кривої змінювання тиску. Потенційна точність методу суттєво залежить від умов градування засобу вимірювання, а на похибку результату вимірювання впливають спосіб розташування і закріплення датчика, температура, стабільність параметрів елементів електричної схеми та інші чинники.

Конструкція датчика тиску повинна забезпечувати його надійне розміщення на стволі зброї безпосередньо біля каналу ствола, але при цьому він не має заважати руху кулі та розширенню порохових газів. ТензOMETричний чутливий елемент датчика тиску має перетворювати вимірювану величину на електричний сигнал, при цьому потрібно забезпечити захист чутливого елемента від впливу температури шляхом його ізолюван-

ня від газового середовища. Параметри елементів конструкції датчика повинні забезпечувати його малу інерційність та ефективно затування власних коливань (ці властивості датчика мають відповідати темпам наростання тиску в каналі ствола).

Запропонований датчик тиску [6] (рис. 1) складається з корпусу 1, порожнини 2, заповненої термоізолюючою рідиною 3, в якій розташовано блок із двох тензOMETричних чутливих елементів 4. В корпусі 1 виконано приймальний канал 5, через який вимірюваний тиск діє на мембрану 6. Вона в середній частині має збільшену товщину. Мембрана 6 притискається до корпусу 1 зсередини порожнини 2 за допомогою затискної гайки 7 і забезпечує передавання тиску до термоізолюючої рідини 3 і тензOMETричних чутливих елементів 4. Знімна кришка 8 датчика забезпечує герметичність порожнини 2, а також, за необхідності, відкриває доступ зсередини до затискної гайки 7 і мембрани 6 для заміни останньої на мембрану з більшою або меншою жорсткістю (за потреби змінити верхню межу діапазону вимірювання). Застосування двох тензOMETричних чутливих елементів забезпечує подвійну чутливість датчика (у порівнянні з випадком застосування одного чутливого елемента).

Швидкозмінний тиск  $p$  порохових газів через приймальний канал 5 діє на мембрану 6, яка пружно деформується у бік порожнини і створює відповідний тиск в термоізолюючій рідині 3. Цей тиск впливає на тензOMETричні чутливі елементи, відповідно змінюючи їх електричний опір.

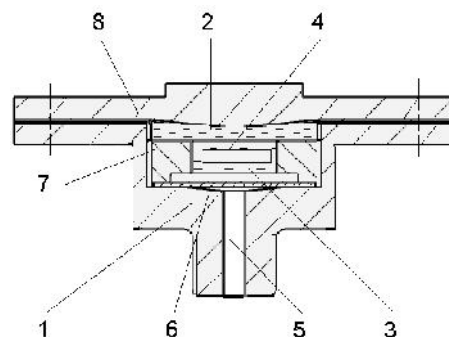


Рис. 1. Конструкція датчика тиску

На рис. 2 показано загальний вигляд датчика тиску.



Рис. 2. Загальний вигляд датчика тиску

Розглянутий датчик тиску застосовується у балістичному пристрої, який має забезпечувати можливість оперативної зміни довжини ствола та розміщення декількох датчиків тиску уздовж каналу ствола.

Розроблений балістичний пристрій (рис. 3) складається з опори 1, на якій встановлено ствол, що складається із знімних секцій 2 – 4. В них виконані два протилежні різьбові отвори, в кожному з яких можна встановити датчик тиску 5–7 або різьбові пробки 8–10, та затильника 11 з приєднаним до нього електрифікованим дистанційним ударно-спусковим механізмом 12 [7]. За необхідності в різьбових отворах замість датчиків тиску можна встановити допоміжні датчики температури.

Застосування секційної будови ствола дає змогу оперативно змінювати його довжину шляхом додавання або видалення необхідної кількості знімних секцій і, таким чином, моделювати процеси пострілу для різних зразків стрілецької зброї. Розміщення двох протилежних різьбових отворів у знімних секціях уможливує встановлення датчиків тиску одночасно в декількох перерізах каналу ствола, що забезпечує можливість дослідження процесу зміни тиску порохових газів уздовж каналу ствола. Крім того, при

встановленні двох датчиків тиску в протилежних різьбових отворах однієї знімної секції можливо виконувати звіряння отриманих за їх допомогою кривих тиску, градування одного з датчиків за вимірювальним сигналом від іншого, дослідження метрологічних характеристик датчиків тощо.

На рис. 4 показано загальний вигляд балістичного пристрою. Для перетворення зміни опору тензометричних чутливих елементів на напругу у складі дослідної установки (ДУ) застосовується мостовий вимірювальний перетворювач, який живиться стабілізованим постійним струмом напругою 100 – 120 В. Тензометричні чутливі елементи датчика тиску вмикаються до протилежних плечей моста, а для балансування моста перед вимірюванням в одне з плечей, що залишилися, включається підстроювальний резистор. Сигнал вимірювальної інформації  $U$ , пропорційний зміні опору чутливого елемента, знімається з вимірювальної діагоналі моста та надходить до засобів вимірювальної техніки, які здійснюють реєстрацію (візуалізацію) вимірювальної інформації або визначення параметрів форми кривої тиску.

Для реєстрації кривої тиску в ДУ застосовується цифровий запам'ятовуючий осцилограф (можливе також застосування з цією метою окремих узгоджувального пристрою, системного аналого-цифрового перетворювача та ЕОМ з відповідним програмним забезпеченням). До складу допоміжного обладнання ДУ входять джерело живлення мостового вимірювального перетворювача, джерело живлення електрифікованого дистанційного ударно-спускового механізму та пристрої комутації.

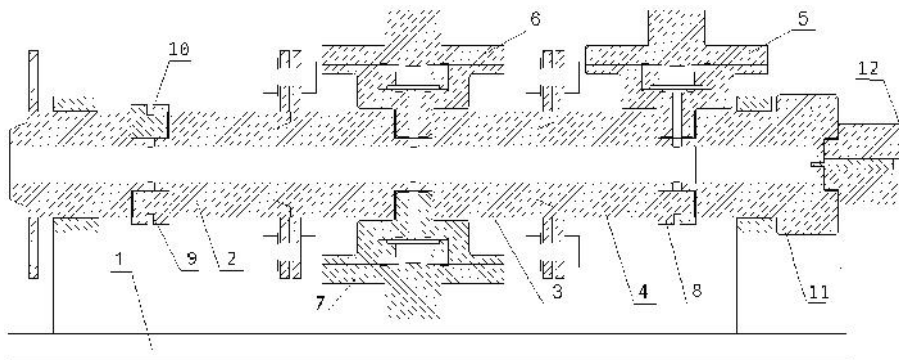


Рис. 3. Конструкція балістичного пристрою

На рис. 5 зображено ДУ з встановленим на балістичному пристрої датчиком тиску, мостовим вимірювальним перетворювачем, цифровим запам'ятовуючим осцилографом та допоміжним обладнанням.

Статична характеристика датчика тиску визначається виразом [3]  $U = k p$ , причому передаточний коефіцієнт  $k$  залежить від геометричних параметрів елементів датчика, стискуваності термоізолюючої рідини, модуля пружності і коефіцієнта Пуасона матеріалу мембрани, тензометричного коефіцієнту матеріалу чутливого елемента.

Проте для вирішення проблем, пов'язаних із синтезом та оцінюванням технічних характеристик засобу вимірювання тиску, потрібно мати узагальнену математичну модель датчика у вигляді передавальної функції, яка б встановлювала зв'язок між ха-

рактеристиками датчика та його фізичними параметрами. Тому, згідно з відомими принципами побудови вимірювальних приладів прямого перетворення, модель датчика тиску доцільно подати у вигляді послідовного з'єднання декількох елементарних перетворювачів, властивості яких визначаються їх передавальними функціями  $W_i(s)$  (рис. 6).

Перший елементарний перетворювач ( $W_1(s)$ ) – 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.

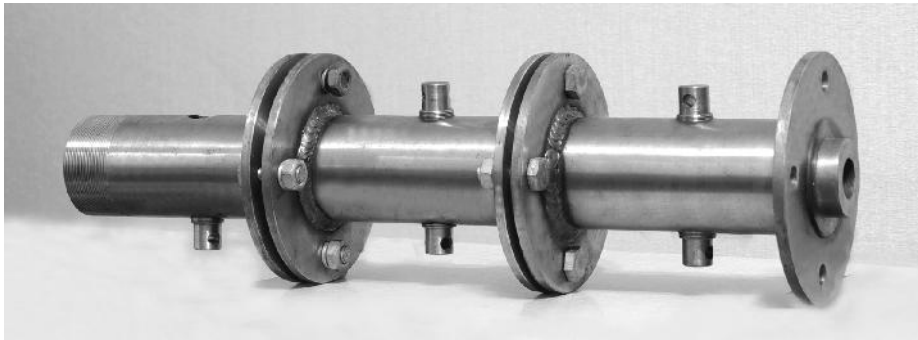


Рис. 4. Загальний вигляд балістичного пристрою

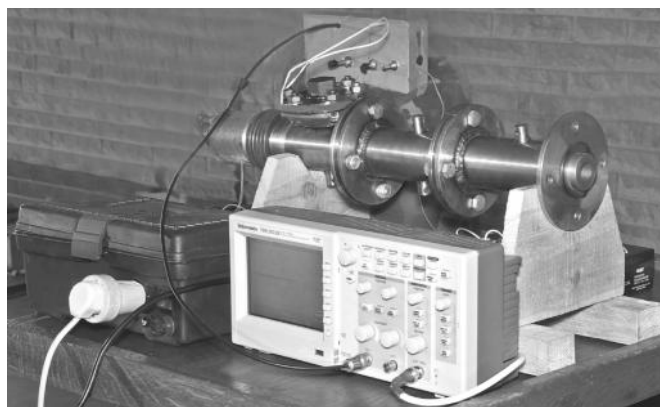


Рис. 5. Загальний вигляд дослідної установки

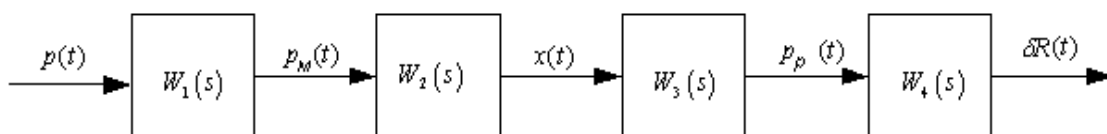


Рис. 6. Структурна схема датчика тиску

Другий перетворювач ( $W_2(s)$ ) – мембрана датчика тиску. Вихідним сигналом є переміщення центральної точки мембрани  $x(t)$ , зумовлене тиском шару газу, що безпосередньо контактує з мембраною.

Третій перетворювач ( $W_3(s)$ ) – термоізолююча рідина, що заповнює внутрішній об'єм датчика. Вихідним сигналом є тиск  $p_p(t)$  рідини на тензорезистор.

Четвертий перетворювач ( $W_4(s)$ ) – тензометричний чутливий елемент. Вихідним сигналом є відносна зміна електричного опору  $\mathcal{R}(t)$ , внаслідок обтискання тензорезистора рідиною.

Використовуючи опис елементарних перетворювачів диференціальними рівняннями та застосовуючи методи теорії автоматичного управління (зокрема, перетворення за Лапласом) [9], отримаємо передавальну функцію датчика

$$W(s) = e^{-\tau_s s} \frac{1}{T_n s + 1} \frac{k_m}{T_m^2 s^2 + 2\xi_m T_m s + 1} \times \frac{k_p}{T_p^2 s^2 + 2\xi_p T_p s + 1} K, \quad (1)$$

де  $\tau_s$  – 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 [3];  $k_m$ ,  $T_m$ ,  $\xi_m$  – 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 і густини, а також геометричних розмірів порожнини;  $K$  – тензометричний коефіцієнт матеріалу чутливого елемента [3].

Наявність передавальної функції датчика з відомими параметрами дає можливість оцінити його динамічну похибку, якщо частотні властивості вхідного сигналу датчика приблизно відомі. Вирішення цієї задачі можливе

на основі моделювання закону зміни тиску в каналі ствола під час пострілу та урахування степеня спотворення кривої тиску датчиком.

Модель вхідного сигналу датчика тиску може бути побудована на основі розв'язання рівнянь, що зв'язують тиск  $p(x)$  в каналі ствола, час  $t$  з моменту початку руху кулі до моменту досягнення нею координати  $x$  упродовж каналу ствола та швидкості  $v(x)$  кулі [2]:

$$\begin{cases} p(x) = \frac{\eta \cdot f}{s} \frac{\psi(x) - \frac{B \cdot \theta}{2} x^2}{l_\phi + x}, \\ v(x) = v_{np} \sqrt{1 - \left(\frac{x + l_k}{x + l_n}\right)^\theta} \cdot \left(1 - \frac{v_m^2}{v_{36}^2}\right), \\ t = \frac{2x}{v(x)} + \int_0^x \frac{dy}{v(y)}, \end{cases} \quad (2)$$

де  $\eta$  – маса пороху,  $f$  – сила пороху,  $S$  – площа поперечного перерізу каналу ствола,  $\psi(x)$  – відносний об'єм пороху, що згорів,  $B$  – параметр Дроздова [2],  $\theta$  – газова стала,  $l_\phi$  – приведена довжина вільного об'єму комори,  $v_{36}$ ,  $v_m$  – зведена та максимальна швидкості кулі,  $l_n$  – довжина патронника,  $l_k$  – довжина каналу ствола.

Розв'язок системи (2) у вигляді залежності тиску в каналі ствола від часу з моменту початку руху кулі може бути отримане як аналітичним шляхом, так і чисельно. Рішення, отримане аналітичним шляхом, не дає змогу швидко проводити розрахунки, які необхідні при визначенні кривих тиску для різних параметрів заряджання та геометричних розмірів каналів стволів зброї, тому перевагу слід віддати чисельному розв'язанню задачі. Оскільки розв'язок системи (2) у подальшому підлягатиме інтегруванню, доцільне його подання у вигляді поліному [10]:

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

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

У загальному випадку спектральну щільність вхідного сигналу датчика можна визначити виразом

$$S_{ex}(\omega) = 2 \int_0^{\infty} p(t) e^{-i\omega t} dt. \quad (4)$$

Датчик тиску, відомі параметри якого визначають його передавальну функцію  $W(s)$  і амплітудно-фазову частотну характеристику  $W(j\omega)$  [1], є динамічною ланкою. Вона через інерційність спотворює вхідний сигнал  $p(t)$ , що й призводить до появи відповідної динамічної похибки. Тому спектральна щільність  $S_{вих}(\omega)$  сигналу  $\delta R(t)$  на виході датчика відрізнятиметься від спектральної щільності  $S_{ex}(\omega)$  вхідного сигналу.

Враховуючи, що відносна комплексна динамічна похибка  $\delta(j\omega)$  датчика, зведена до його входу, визначається

$$\delta(j\omega) = \frac{W(j\omega)}{W(0)} - 1, \quad (5)$$

можна обчислити спектральну щільність динамічної похибки датчика

$$S_{вих}(\omega) = \left( \frac{W(j\omega)}{W(0)} - 1 \right)^2 S_{ex}(\omega). \quad (6)$$

Оскільки  $W(0) = k_m k_g K$ , вираз для середньоквадратичного значення динамічної похибки подамо у вигляді

$$\sigma_{дин} = \sqrt{2 \int_0^{\infty} \left( \frac{W(j\omega)}{k_m k_g K} - 1 \right)^2 S_{ex}(\omega) d\omega}. \quad (7)$$

Можна також розглянути та оцінити кількісно відносне значення динамічної похибки, яке визначатиметься відношенням  $\sigma_{дин}$  до  $\sigma_{ex}$ :

$$\delta_{дин} = \frac{\sigma_{дин}}{\sigma_{ex}} = \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} \left( \frac{W(j\omega)}{k_m k_g K} - 1 \right)^2 S_{ex}(\omega) d\omega}{\int_0^{\infty} S_{ex}(\omega) d\omega}}. \quad (8)$$

Цей вираз встановлює однозначний зв'язок між параметрами заряджання, характеристиками зразка стрілецької зброї, параметрами передавальної функції датчика тиску та його динамічною похибкою за конкретних умов проведення вимірювань.

Кількісна оцінка свідчить, що для характерних поєднань параметрів заряджання і фізичних параметрів датчика тиску значення  $\delta_{дин}$  перебуває в діапазоні 2,0...2,5 %.

Таким чином, запропонована математична модель (8) динамічної похибки датчика для вимірювання миттєвого тиску в каналах стволів стрілецької зброї може бути застосована як для вирішення прямої задачі – оцінки динамічної похибки вимірювання миттєвих значень тиску порохових газів під час пострілу, так і для розв'язання зворотної задачі – обґрунтування раціональних параметрів датчика тиску, який характеризується обмеженою на заданому рівні динамічною похибкою.

### Висновки

Запропоновано конструкцію та виготовлено діючий макет дослідної установки для вимірювання миттєвих значень тиску в каналах стволів стрілецької зброї.

Розроблено узагальнену математичну модель датчика тиску у вигляді передавальної функції, встановлено зв'язки між параметрами такої математичної моделі і фізичними параметрами датчика тиску.

Запропоновано математичну модель динамічної похибки датчика тиску, визначено зв'язки між динамічною похибкою, параметрами датчика тиску та параметрами вхідного сигналу.

Виконано серію пробних вимірювань тиску в каналі ствола дослідної установки, підтверджено працездатність елементів конструкції дослідної установки та її безпечність при виконанні вимірювань.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на виконання таких завдань:

отримання обсягів вимірювальної інформації, достатніх для перевірки адекватності математичних моделей, одержаних теоретичним шляхом, і статистичної обробки результатів вимірювань;

побудова математичних моделей, аналіз характеру прояву і оцінка складових додаткової похибки засобу вимірювання тиску, оцінка результуючої інструментальної похибки, а також розробка способів забезпечення потрібної точності вимірювань;

розробка теоретичних і прикладних основ метрологічного забезпечення датчика миттєвих значень тиску.

Список використаної літератури

1. Бабин А. И. Автоматизация производственных процессов / А. И. Бабин, С. П. Санников. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2002. – 144 с.
2. Голомбовский А. К. Теория и расчёт автоматического оружия / А. К. Голомбовский. и др. – Пенза: ПВАИУ, 1973. – 493 с.
3. Крюков О. М. Математична модель датчика для вимірювання миттєвих значень тиску в каналах стволів стрілецької зброї / О. М. Крюков, О. А. Александров // Озброєння та військова техніка № 4 (24) ХУПС. – 2010. – С. 83-89.
4. Крюков О. М. Шляхи підвищення точності моделювання внутрішньобалістичних процесів / О. М. Крюков, О. А. Александров // Озброєння та військова техніка. ХУПС. – 2009. – С. 79-89.
5. Михайлов К. В. Экспериментальная баллистика. Приборы и методы баллистических измерений / К. В. Михайлов и др. – София: ВТС, 1976. – 388 с.
6. Патент України № 53153 «Датчик миттєвих значень швидкозмінного тиску» від 27.09.2010.
7. Патент України № 58095. Пристрій для балістичних випробовувань стрілецької зброї та боєприпасів» від 25.03.2011.
8. Полищук Е. С. Измерительные преобразователи / Е. С. Полищук– К.: Вища школа, 1990. – 480 с.
9. Попов Е. П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / Е. П. Попов – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 304 с.
10. Тынкевич М. А. Численные методы анализа: учебное пособие / М. А. Тынкевич – Кемерово: 2002. – 184 с.

Отримано 15.05.2012

References

1. Babin A. I. Automation of production processes / A. I. Babin, S. P. Sannikov. – Ekaterenburg: USFEU, 2002. - 144 p. [in Russian].
2. Golombovsky A. K. Theory and Design of an automatic weapon / A. K. Golombovsky

and others – Penza: PVAIU, 1973. – 493 p. [in Russian].

3. Kryukov A. Mathematical model of the sensor for measuring the instantaneous values of pressure in the bore of small arms / O. Kryukov, A. A. Alexandria / Arms and military equipment № 4 (24) KUAF. – 2010. – P. 83–89 [in Russian].

4. Kryukov A. Ways to improve the accuracy of modeling processes vnutrishnobalistychnyh / O. Kryukov, A. A. Alexandria // Arms and military equipment. HUPS. – 2009. – P. 79–89 [in Russian].

5. Mikhailov K. V. Experimental Ballistics. Devices and Methods of Measurement in Ballistic / K.V. Mikhailov and others – Sofia: PTS, 1976. – 388 p. [in Russian].

6. Patent of Ukraine № 53153 "sensor instantaneous values of rapidly changing pressure" from 27.09.2010 [in Ukrainian].

7. Patent of Ukraine № 58095 "device for ballistic testing of small arms and ammunition" from 25.03.2011 [in Ukrainian].

8. Polishchuk E. Transmitters / E. Polishchuk, Kiev: Vishcha School, 1990. – 480 p. [in Russian].

9. Popov E. P. Theory of linear automatic control systems and management: Handbook. Manual for Technical Schools. - 2nd ed., Revised. and added / E. P. Popov. – Moscow: Nauka. Chap. Ed. Sci. literature., 1989. – 304 p. [in Russian].

10. Tynkevich M. A. Numerical methods of analysis: a tutorial / M. A. Tynkevich. – Kemerovo: 2002, – 184 p. [in Russian].



Крюков  
Олександр Михайлович,  
д.т.н., проф. каф. Озброєння,  
Академії внутрішніх військ МВС України,  
м. Харків,  
тел. 739-15-26



Александров  
Олександр Анатолійович,  
ст. наук. співробітник науково-дослідного центру  
Академії внутрішніх військ МВС України,  
м. Харків.  
тел. 739-15-26