

**Аналіз електричних та магнітних властивостей шаруватих напівпровідникових кристалів типу азв<sub>6</sub>, інтеркальованих металами з огляду на їх військове застосування**

Б.О. Середюк, Ф.О. Иващишин, Б.Я. Кулик

*У статті виконаний аналіз перспектив застосування магніторезистивних структур на основі напівпровідникових кристалів типу InSe для прецизійного вимірювання магнітного поля. Розглянуто можливість застосування сенсорів магнітного поля на основі структури InSe для виявлення військової бронетехніки. Досліджено вплив домішок металів на шарувату структуру напівпровідникового матеріалу як на сильний ковалентний зв'язок всередині шару, так і на слабкий Ван-дер-Ваальсовий зв'язок у міжшаровому просторі. Проаналізовано діаграми Найквіста для кристалу InSe, з домішками нікелю при різних температурах від кімнатної до температури рідкого азоту. Топологічні знімки поверхонь InSe, використовуючи методику атомно силової спектроскопії, підтверджують його шарувату структуру.*

**Ключові слова:** шаруватий напівпровідник, імпеданс, діаграми Найквіста, інтеркаляція.

**Анализ электрических и магнитных свойств слоистых полупроводниковых кристаллов типа азв<sub>6</sub> интеркалированных металлами с точки зрения их военного применения**

Б.А. Середюк, Ф.О. Иващишин, Б.Я. Кулык

*В статье выполнен анализ перспектив применения магниторезистивных структур на основе полупроводниковых кристаллов типа InSe для прецизионного измерения магнитного поля. Рассмотрена возможность применения сенсоров магнитного поля на основе структуры InSe для обнаружения военной бронетехники. Исследовано влияние примесей металлов на слоистую структуру полупроводникового материала как на сильную ковалентную связь внутри слоя, так и на слабую Ван-дер-Ваальсовую связь в межслоевом пространстве. Проанализированы диаграммы Найквиста для кристалла InSe с примесями никеля при различных температурах от комнатной до температуры жидкого азота. Топологические снимки поверхностей InSe, используя методику атомно силової спектроскопії, подтверждают его слоистую структуру.*

**Ключевые слова:** слоистый полупроводник, импеданс, диаграммы Найквиста, интеркаляция.

УДК 623.546

П. П. Ткачук, Л.Д. Величко, І.В. Горчинський

*Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів***ВПЛИВ ВІТРУ НА ЗОВНІШНЮ БАЛІСТИКУ КУЛІ, ВИПУЩЕНОЇ ІЗ СВД**

*У роботі розглядається динаміка руху кулі у повітрі, випущеної із снайперської гвинтівки Драгунова. Вважається, що на неї діють сила лобового опору повітря, вага кулі та сила, спричинена дією бічного вітру. Сила лобового опору повітря залежить від коефіцієнта аеродинамічності, площі поперечного перерізу кулі, густини і швидкості звуку в повітрі, швидкості супутнього або зустрічного вітру, швидкості кулі та двох безрозмірних коефіцієнтів, які мають різні значення при надзвуковій і дозвуковій швидкостях кулі. Величина сили, обумовленої дією бічного вітру, пропорційна максимальній площі повздовжнього перерізу кулі, густині повітря та різниці швидкостей вітру і бічного зміщення кулі, яка піднесена до певного ступеня. Між теоретичними та експериментальними результатами кінематичних параметрів кулі досягнута незначна розбіжність. Однак при дії бічного вітру є значні розбіжності, якщо координата точки обнуління траєкторії понад 700 метрів. Проведенням теоретичної перевірки експериментальних значень встановлено, що на окремих ділянках руху кулі значення середньої швидкості її бічного зміщення суперечить законам механіки.*

**Ключові слова:** зовнішня балістика кулі, сила лобового опору повітря, вплив вітру.

## Постановка проблеми

Значення кінематичних параметрів руху кулі в просторі залежить від багатьох детермінованих (маса і форма кулі, температура заряду та повітря, атмосферного тиску, деривації) та недетермінованих (дульна швидкість кулі, швидкість та напрямок вітру) факторів. Точність стрільби суттєво залежить від врахування цих факторів.

## Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питанню досліджень зовнішньої балістики куль та снарядів присвячена велика кількість наукових статей, огляд яких, наприклад, приведено в роботах [1-4]. На основі теоретичних та експериментальних досліджень базуються таблиці стрільб [5, 6]. Внесення поправок у приціл, на основі таблиць, побудованих на лінійних залежностях між причиною і наслідком.

## Мета статті

Знання функціональних залежностей величин сили лобового опору повітря руху кулі та сили, зумовленої дією бічного вітру, дозволяють оцінити вплив детермінованих та недетермінованих чинників на кінематичні параметри руху кулі. Тому метою статті є якісне врахування цих чинників, що дозволить покращити ймовірність влучення стрільцем у ціль.

## Основна частина

Під час руху кулі в повітрі на неї діють сили:  $\vec{P}$  – вага кулі,  $\vec{R}$  – лобовий опір повітря,  $\vec{F}$  – бічна сила.

Початок декартової системи координат  $Oxuz$  розміщуємо в точці вильоту кулі. Осі  $Ox$  та  $Oy$  лежать в площині горизонту зброї, а вісь  $Oz$  – скеровуємо вертикально вгору. Вісь  $Ox$  напрямляємо від точки вильоту кулі до цілі.

Використовуючи другий закон динаміки, запишемо рівняння (рис. 1)

$$m \vec{a} = \vec{P} + \vec{R} + \vec{F}, \quad (1)$$

де  $m$  – маса і  $\vec{a}$  – пришвидшення кулі.

Накладається умова, що величина сили лобового опору повітря руху кулі не залежить від швидкості її бічного зміщення. Тому при наявності супутнього вітру вона описується залежністю

$$R(t) = c_x \rho_a s_x (V(t) - V_{wx} \cos \theta)^{2+\gamma_1} \left( \frac{V(t) - V_{wx} \cos \theta}{V_a} \right)^{\beta_1}, \quad (2)$$

де

$$V(t) = \sqrt{(\dot{x}(t))^2 + (\dot{z}(t))^2}, \quad (3)$$

$c_x$  – коефіцієнт аеродинамічності форми кулі;  $\rho_a$  – густина повітря,  $s_x$  – максимальна площа поперечного перерізу кулі площиною, перпендикулярною до напрямку її швидкості;  $\theta$  – кут нахилу вектора швидкості кулі до горизонту в довільний момент часу,  $\dot{x}(t)$  – проекція швидкості кулі на вісь  $Ox$ ;  $\dot{z}(t)$  – проекція швидкості кулі на вісь  $Oz$ ;  $V_a$  – величина швидкості звуку в повітрі;  $\gamma_i$  ( $i=1,2$ ) і  $\beta_i$  ( $i=1,2$ ) – коефіцієнти, значення яких визначають, використовуючи результати експериментальних досліджень, та їх величини, які є різними при надзвуківій ( $i=1$ ) та дозвуківій швидкостях ( $i=2$ ).

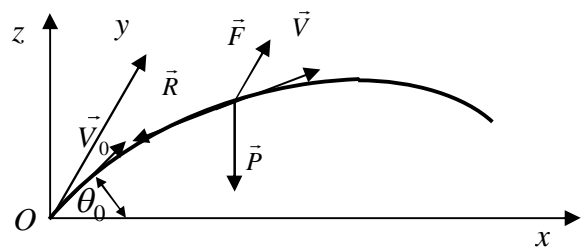


Рис. 1. Схема руху кулі в повітрі

Величину бічної сили, яка спричинена дією бічного вітру на кулю, описується формулою

$$F = c_y \rho_a s_y (V_{wy} - \dot{y}(t))^\alpha, \quad (4)$$

де  $c_y$  – коефіцієнт, який поєднує характеристику аеродинамічності кулі при бічному вітрі, та коефіцієнт пропорційності;  $s_y$  – площа повздовжнього перерізу кулі площиною, яка проходить через її вісь симетрії;  $V_{wy}$  – швидкість бічного вітру, який скерований перпендикулярно до лінії прицілювання;  $\dot{y}(t)$  – бічна швидкість кулі, обумовлена дією вітру;  $\alpha$  – коефіцієнт нелінійності.

Проектуючи рівняння (1) на осі координат і враховуючи (2)–(4), отримаємо наступну систему диференціальних рівнянь, які описують рух кулі

$$\ddot{x}(t) = -\frac{c_x \rho_a s_x}{m V_a^{\beta_1}} \left( \frac{(\dot{x}(t))^2 + (\dot{z}(t))^2 - V_{wx} \dot{x}(t)}{\sqrt{(\dot{x}(t))^2 + (\dot{z}(t))^2}} \right)^{2+\gamma_1+\beta_1} \times \frac{\dot{x}(t)}{\sqrt{(\dot{x}(t))^2 + (\dot{z}(t))^2}}, \quad (5)$$

$$m \ddot{y} = c_y \rho_a s_y (V_{wy} - \dot{y}(t))^\alpha, \quad (6)$$

$$\ddot{z}(t) = -g - \frac{c_x \rho_a s_x}{m V_a^{\beta_1}} \left( \frac{(\dot{x}(t))^2 + (\dot{z}(t))^2 - V_{wx} \dot{x}(t)}{\sqrt{(\dot{x}(t))^2 + (\dot{z}(t))^2}} \right)^{2+\gamma_1+\beta_1} \times \frac{\dot{z}(t)}{\sqrt{(\dot{x}(t))^2 + (\dot{z}(t))^2}}, \quad (7)$$

де  $g = 9,81 \frac{м}{с^2}$  – прискорення вільного падіння тіла.

У силу накладеної умови рівняння (6) явно не залежить від рівнянь (5) і (7).

На початку руху кулі її швидкість є надзвуковою, тому необхідно розв'язувати систему диференціальних рівнянь (5) і (7) при  $(i=1)$ , враховуючи початкові умови:

$$\begin{aligned} x(0) &= 0, \dot{x}(0) = V_0 \cos \theta_0, \\ z(0) &= 0, \dot{z}(0) = V_0 \sin \theta_0, \end{aligned} \quad (8)$$

де  $V_0$  – початкова швидкість кулі,  $\theta_0$  – кут кидання.

Диференціальне рівняння (6) має наступні початкові умови

$$y(0)=0, \dot{y}(0)=0. \quad (9)$$

Оскільки, аналітичний розв'язок системи диференціальних рівнянь (5) і (7) отримати проблематично, то розв'язок отримували, використовуючи відповідне програмне забезпечення.

Під час дослідження динаміки руху кулі під дією тільки супутнього або зустрічного вітру брались наступні значення параметрів: маса кулі  $m = 0,0096 \text{ кг}$ , початкова швидкість  $V_0 = 830 \frac{м}{с}$ , калібр  $d = 7,62 \text{ мм}$ , площа поперечного перерізу  $s_x = \pi \cdot 0,00395^2 \text{ м}^2$ , густина повітря  $\rho_a = 1,2094 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ , значення величин  $c_x = 0,9$ ,  $\gamma_1 = -0,26$ ,  $\beta_1 = -0,005$ ,  $\gamma_2 = -0,341$  і  $\beta_2 = 2,1$ .

Таблиця 1

Повна горизонтальна дальність та тривалість польоту кулі калібру 7,62, випущеної із СВД, залежно від швидкості вітру

$V_{wx}$ швидкість вітру	$\theta_0$ , <i>радіан</i> – кут кидання, при якому має місце обнуління траєкторії на віддалі $d$					
	$\theta_0=0,001629$ $d=200 \text{ м}$	$\theta_0=0,003778$ $d=400 \text{ м}$	$\theta_0=0,006673$ $d=600 \text{ м}$	$\theta_0=0,010669$ $d=800 \text{ м}$	$\theta_0=0,016243$ $d=1000 \text{ м}$	$\theta_0=0,023560$ $d=1200 \text{ м}$
$-10 \frac{м}{с}$	$x_k = 199,43$ $t_k = 0,2660$	$x_k = 397,80$ $t_k = 0,5917$	$x_k = 594,89$ $t_k = 0,9949$	$x_k = 790,63$ $t_k = 1,5009$	$x_k = 985,41$ $t_k = 2,1162$	$x_k = 1179,19$ $t_k = 2,8147$
$-8 \frac{м}{с}$	$x_k = 199,58$ $t_k = 0,2661$	$x_k = 398,26$ $t_k = 0,5919$	$x_k = 595,94$ $t_k = 0,9954$	$x_k = 792,51$ $t_k = 1,5018$	$x_k = 988,34$ $t_k = 2,1182$	$x_k = 1183,36$ $t_k = 2,8176$
$-6 \frac{м}{с}$	$x_k = 199,66$ $t_k = 0,2661$	$x_k = 398,67$ $t_k = 0,5920$	$x_k = 596,95$ $t_k = 0,9958$	$x_k = 794,35$ $t_k = 1,5026$	$x_k = 991,24$ $t_k = 2,1201$	$x_k = 1187,53$ $t_k = 2,8205$
$-4 \frac{м}{с}$	$x_k = 199,75$ $t_k = 0,2661$	$x_k = 399,13$ $t_k = 0,5922$	$x_k = 597,95$ $t_k = 0,9962$	$x_k = 796,23$ $t_k = 1,5035$	$x_k = 994,15$ $t_k = 2,1220$	$x_k = 1191,67$ $t_k = 2,8233$
$-2 \frac{м}{с}$	$x_k = 199,90$ $t_k = 0,2662$	$x_k = 399,59$ $t_k = 0,5924$	$x_k = 599,00$ $t_k = 0,9967$	$x_k = 798,11$ $t_k = 1,5044$	$x_k = 997,08$ $t_k = 2,1240$	$x_k = 1195,83$ $t_k = 2,8262$
$0 \frac{м}{с}$	$x_k = 199,98$ $t_k = 0,2662$	$x_k = 399,99$ $t_k = 0,5925$	$x_k = 600,01$ $t_k = 0,9971$	$x_k = 799,99$ $t_k = 1,5053$	$x_k = 1000,01$ $t_k = 2,1260$	$x_k = 1200,01$ $t_k = 2,8292$
$2 \frac{м}{с}$	$x_k = 200,07$ $t_k = 0,2662$	$x_k = 400,46$ $t_k = 0,5927$	$x_k = 601,01$ $t_k = 0,9975$	$x_k = 801,87$ $t_k = 1,5062$	$x_k = 1002,92$ $t_k = 2,1279$	$x_k = 1204,16$ $t_k = 2,8321$
$4 \frac{м}{с}$	$x_k = 200,22$ $t_k = 0,2663$	$x_k = 400,92$ $t_k = 0,5929$	$x_k = 602,06$ $t_k = 0,9980$	$x_k = 803,75$ $t_k = 1,5071$	$x_k = 1005,85$ $t_k = 2,1299$	$x_k = 1208,33$ $t_k = 2,8351$
$6 \frac{м}{с}$	$x_k = 200,30$ $t_k = 0,2663$	$x_k = 401,38$ $t_k = 0,5931$	$x_k = 603,07$ $t_k = 0,9984$	$x_k = 805,63$ $t_k = 1,5080$	$x_k = 1008,79$ $t_k = 2,1319$	$x_k = 1212,49$ $t_k = 2,8381$
$8 \frac{м}{с}$	$x_k = 200,45$ $t_k = 0,2664$	$x_k = 401,78$ $t_k = 0,5932$	$x_k = 604,08$ $t_k = 0,9988$	$x_k = 807,52$ $t_k = 1,5089$	$x_k = 1011,76$ $t_k = 2,1340$	$x_k = 1216,65$ $t_k = 2,8411$
$10 \frac{м}{с}$	$x_k = 200,54$ $t_k = 0,2664$	$x_k = 402,24$ $t_k = 0,5934$	$x_k = 605,13$ $t_k = 0,9993$	$x_k = 809,41$ $t_k = 1,5098$	$x_k = 1014,69$ $t_k = 2,1360$	$x_k = 1220,84$ $t_k = 2,8442$

В таблиці 1:  $x_k$  – повна горизонтальна дальність польоту кулі в метрах,  $t_k$  – тривалість польоту кулі в секундах,  $V_{wx}$  – швидкість вітру, якщо її величина є зі знаком (–), то вітер зустрічний.

Аналізуючи приведені результати обчислень, можна стверджувати, що швидкість вітру не суттєво впливає при стрільбі на малу віддаль, однак при стрільбі на велику віддаль швидкість вітру необхідно враховувати. Супутній вітер сприяє дальності польоту кулі та збільшує тривалість її

польоту, а зустрічний – зменшує дальність польоту кулі та тривалість її польоту.

Для оцінки результатів кінематики кулі, з врахуванням дії супутнього або зустрічного вітру, отриманих теоретично, порівняємо їх з результатами експериментальних досліджень, які приведені в [5]. У таблиці 2:  $V_{wx}$  – швидкість супутнього вітру,  $\Delta x_{theo}$  – приріст польоту кулі по горизонталі отриманий теоретичним методом,  $\Delta x_{exp}$  – приріст польоту кулі по горизонталі, визначений експериментальним методом.

Таблиця 2

Приріст повної горизонтальної дальності польоту кулі калібру 7,62 випущеної із СВД залежно від швидкості вітру, отримана теоретичним та експериментальним методами

d, м	$\theta_0$ , радіан	$V_{wx}=4\text{ м/с}$		$V_{wx}=10\text{ м/с}$	
		$\Delta x_{\text{theo}}$ м	$\Delta x_{\text{exp}}$ м	$\Delta x_{\text{theo}}$ м	$\Delta x_{\text{exp}}$ м
100	0,000761	0,09	0	0,23	0
200	0,001629	0,22	0	0,54	0
300	0,002627	0,53	0	1,29	1
400	0,003778	0,92	1	2,24	2
500	0,005113	1,36	1	3,48	3
600	0,006673	2,06	2	5,13	4
700	0,008504	2,80	2	7,08	6
800	0,010669	3,75	3	9,41	8
900	0,1324	4,82	4	12,06	10
1000	0,016243	5,85	5	14,69	13
1100	0,019682	7,04	6	17,60	16
1200	0,02356	8,33	8	20,84	20
1300	0,027882	9,82	10	24,46	24

Найбільша розбіжність між результатами теоретичних та експериментальних досліджень при швидкості супутнього вітру  $V_{wx} = 4\text{ м/с}$  є при стрільбі на віддалі 1100 метрів і вона дорівнює 1,04 метри.

Якщо швидкість супутнього вітру дорівнює  $V_{wx} = 10\text{ м/с}$ , то найбільша розбіжність є при стрільбі на віддалі 900 метрів і вона дорівнює 2,06 метра.

Для дослідження величини бічного зміщення кулі під дією бічного вітру необхідно розв'язати диференціальне рівняння (6) при початкових умовах (9). Його розв'язок матиме вигляд:

$$\dot{y}(t) = V_{wy} \left[ (V_{wy})^{1-\alpha} - \frac{c_y \rho_a s_y (1-\alpha)t}{m} \right]^{-\frac{1}{1-\alpha}}, \quad (10)$$

$$y(t) = V_{wy} t + \frac{m}{c_y \rho_a s_y (2-\alpha)} \left[ (V_{wy})^{1-\alpha} - \frac{c_y \rho_a s_y (1-\alpha)t}{m} \right]^{-\frac{2-\alpha}{1-\alpha}} - \frac{m}{c_y \rho_a s_y (2-\alpha)} V_w^{2-\alpha}. \quad (11)$$

Значення параметрів  $\alpha$ ,  $c_y$  залежить від того, який рух здійснює повітря: ламінарний, турбулентний чи поєднання цих рухів. Для цього необхідно визначити значення числа Рейнольдса, ( $Re$ ) використовуючи формулу

$$Re = \frac{V \cdot l}{\nu}, \quad (12)$$

де:  $V$  – швидкість вітру;  $l$  – характерний розмір тіла;  $\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря, який в температурному діапазоні  $-20^\circ\text{C} \leq t^\circ\text{C} \leq 40^\circ\text{C}$  змінюється в межах  $12,79 \cdot 10^{-6} \leq \nu \leq 16,96 \cdot 10^{-6}$ . Якщо:  $Re < 2300$ , то рух повітря ламінарний; при  $2300 < Re < 10000$  – рух повітря включає поєднання ламінарного і турбулентного рухів;  $10000 < Re$  – рух повітря турбулентний. На основі проведених обчислень можна вважати, якщо швидкість вітру скерована перпендикулярно до лінії прицілювання і  $V_{wy} \leq 4,5\text{ м/с}$ , то повітря буде рухатись ламінарно, обтікаючи кулю, а при  $4,5\text{ м/с} \leq V_{wy}$  – обтікання кулі повітрям буде в поєднанні ламінарного і турбулентних рухів.

**Розглянемо динаміку руху кулі під дією бічного вітру.** Вихідні значення параметрів того жні попереднім, коли визначали вплив супутнього вітру на кулю, а площа повздовжнього перерізу кулі –  $s_y = 0,00021\text{ м}^2$ .

Методом послідовних наближень визначили, що значення коефіцієнтів  $\alpha$  і  $c_y$  сили бічної дії вітру, яка описується залежністю (4), при швидкості вітру  $V = 4\text{ м/с}$ , наступні:  $\alpha_1 = 1,3$ ,  $c_{y1} = 18,6$ , а при швидкості вітру  $V = 10\text{ м/с}$  –  $\alpha_2 = 1,3$ ,  $c_{y2} = 14,5$ .

Значення кінематичних параметрів кулі під дією бічного вітру приведені в таблиці 3. У ній:  $t_k$  – тривалість польоту кулі,  $x(t_k)$  – координата кулі відносно осі  $Ox$  на вказаний момент часу,  $V_{wy}$  – швидкість бічного вітру,  $y(t_k)$  і  $\dot{y}(t_k)$  – зміщення та швидкість бічного зміщення кулі, спричиненні дією вітру,  $y_{\text{exp}}$  – зміщення кулі спричинене дією вітру, визначене експериментальним методом [5],  $\Delta y$  – різниця між теоретичними та експериментальними значеннями зміщеннями кулі, спричинена бічним вітром, оцінена у метрах.

Таблиця 3

Зміщення кулі під дією вітру, скерованого перпендикулярно до лінії прицілювання

$t_k, \text{с}$	$x(t_k)$	$V_{wy} = 4\text{ м/с}$				$V_{wy} = 10\text{ м/с}$			
		$\dot{y}(t_k), \text{м/с}$	$y(t_k), \text{м}$	$y_{\text{exp}}, \text{м}$	$\Delta y, \text{м}$	$\dot{y}(t_k), \text{м/с}$	$y(t_k), \text{м}$	$y_{\text{exp}}, \text{м}$	$\Delta y, \text{м}$
0,1265	100	0,355	0,023	0,02	0,003	0,910	0,059	0,06	-0,001
0,2662	200	0,702	0,097	0,10	-0,003	1,794	0,249	0,26	-0,011
0,4209	300	1,037	0,232	0,26	-0,028	2,647	0,594	0,64	-0,046
0,5925	400	1,359	0,438	0,48	-0,042	3,463	1,120	1,20	-0,08

0,7836	500	1,665	0,728	0,72	0,008	4,239	1,858	1,80	0,058
0,9971	600	1,956	1,116	1,12	-0,004	4,970	2,844	2,80	0,044
1,2363	700	2,228	1,617	1,64	-0,023	5,652	4,117	4,10	0,017
1,5053	800	2,480	2,251	2,24	0,011	6,283	5,725	5,60	0,125
1,8047	900	2,709	3,029	2,90	0,129	6,851	7,694	7,30	0,394
2,1260	1000	2,907	3,933	3,70	0,233	7,342	9,977	9,20	0,777
2,4677	1100	3,076	4,956	4,60	0,356	7,761	12,560	11,40	1,160
2,8292	1200	3,220	6,095	5,50	0,595	8,115	15,432	13,70	1,732
3,2096	1300	3,342	7,344	6,50	0,844	8,413	18,578	16,30	2,278

Аналізуючи результати обчислень, приведені в таблиці 3, можна стверджувати:

- швидкість бічного зміщення кулі весь час зростає;

- величина бічного зміщення кулі зростає по нелінійному закону;

- мають місце значні розбіжності між результатами теоретичних та експериментальних досліджень при швидкості вітру  $V_{wy} = 4$  м/с, якщо

координати кулі є більшими  $x(t_k) \geq 800$  м або час її польоту  $t \geq 1,58$  с, при швидкості вітру  $V_{wy} = 10$  м/с, якщо –  $x(t_k) \geq 700$  м і  $t \geq 1,3$  с.

Оскільки мають місце розбіжність, то здійснимо перевірку експериментальних значень. Для цього визначимо величини швидкості бічного зміщення кулі та проаналізуємо їх.

Таблиця 4

Бічне зміщення та бічна швидкість кулі на основі даних експерименту

$t_k, c$	$x(t_k), m$	$\Delta t, c$	$V_{wy} = 4 \text{ м/с}$			$V_{wy} = 10 \text{ м/с}$		
			$y_{exp}, m$	$\Delta y, m$	$\dot{y}_{exp}, \text{ м/с}$	$y_{exp}, m$	$\Delta y, m$	$\dot{y}_{exp}, \text{ м/с}$
0,13	100	0,13	0,02	0,02	0,15	0,06	0,06	0,46
0,27	200	0,14	0,10	0,08	0,57	0,26	0,20	1,43
0,42	300	0,15	0,26	0,16	1,07	0,64	0,38	2,53
0,59	400	0,17	0,48	0,22	1,294	1,20	0,56	3,294
0,78	500	0,19	0,72	0,24	1,263	1,80	0,60	3,158
0,99	600	0,21	1,12	0,40	1,90	2,80	1,00	4,76
1,23	700	0,24	1,64	0,52	2,17	4,10	1,30	5,42
1,50	800	0,27	2,24	0,60	2,222	5,60	1,50	5,56
1,80	900	0,30	2,90	0,66	2,200	7,30	1,70	5,67
2,12	1000	0,32	3,70	0,80	2,50	9,20	1,90	5,94
2,45	1100	0,34	4,60	0,90	2,647	11,40	2,20	6,471
2,82	1200	0,36	5,50	0,90	2,500	13,70	2,30	6,389
3,20	1300	0,38	6,50	1,00	2,631	16,30	2,60	6,84

У таблиці 4:  $\Delta t, c$  – тривалість часу, за який куля долає сто метрів на певній ділянці руху кулі;  $y_{exp}, m$  – зміщення кулі під дією бічного вітру, отримане експериментальним способом [5];  $\Delta y, m$  – різниця між сусідніми зміщеннями;  $\dot{y}_{exp}, \text{ м/с}$  – середня швидкість зміщення кулі під дією бічного вітру на відповідній стометровій ділянці.

У таблиці 4 є неузгодженості між експериментальними даними при швидкості бічного вітру  $V_{wy} = 4$  м/с. Середня швидкість кулі спричинена дією вітру на відрізках:

- 300 – 400 метрів дорівнює  $\dot{y}_{exp} = 1,294$  м/с, а на 400 – 500 метрів –  $\dot{y}_{exp} = 1,263$  м/с;

- 700 – 800 метрів –  $\dot{y}_{exp} = 2,222$  м/с, а на 800 – 900 метрів –  $\dot{y}_{exp} = 2,200$  м/с;

- 1000 – 1100 метрів –  $\dot{y}_{exp} = 2,647$  м/с, а на 1100 – 1200 метрів –  $\dot{y}_{exp} = 2,500$  м/с і на 1200 – 1300 метрів –  $\dot{y}_{exp} = 2,631$  м/с.

Аналогічні неузгодженості мають місце при швидкості вітру  $V_{wy} = 10$  м/с. Так середня швидкість кулі, спричинена дією бічного вітру, на відрізках:

- 300 – 400 метрів дорівнює  $\dot{y}_{exp} = 3,294$  м/с, а на 400 – 500 метрів –  $\dot{y}_{exp} = 3,158$  м/с;

- 1000 – 1100 метрів –  $\dot{y}_{exp} = 6,471 \text{ м/с}$ , а на  
1100 – 1200 метрів –  $\dot{y}_{exp} = 6,389 \text{ м/с}$ .

Оскільки напрямок та величина швидкості бічного вітру є стала, то зменшення швидкості кулі на певних відрізках руху, спричинене дією бічного вітру, неможливе. Тому експериментальні дані зміщення кулі під дією бічного вітру, приведені в «Таблиці 2б» книжки [5] викликають сумнів.

У таблиці 5 наведено бічні зміщення та швидкості бічного зміщення кулі під дією бічного вітру, при різних його швидкостях. Оскільки при швидкості бічного вітру  $V_{wy} \leq 4 \text{ м/с}$  обтікання повітрям кулі є ламінарне, то бічну силу (4) визначали при значеннях  $\alpha_1=1,3$ ,  $c_{y1}=1,86$ .

Таблиця 5

Зміщення кулі під дією бічного вітру зі швидкостями  $V_{wy} = 1 \text{ м/с}$ ,  $V_{wy} = 2 \text{ м/с}$  і  $V_{wy} = 4 \text{ м/с}$

$t_k, c$	$x(t_k)$	$V_{wy} = 1 \text{ м/с}$		$V_{wy} = 2 \text{ м/с}$		$V_{wy} = 4 \text{ м/с}$	
		$\dot{y}(t_k), \text{ м/с}$	$y(t_k), \text{ м}$	$\dot{y}(t_k), \text{ м/с}$	$y(t_k), \text{ м}$	$\dot{y}(t_k), \text{ м/с}$	$y(t_k), \text{ м}$
0,1265	100	0,060	0,004	0,146	0,009	0,355	0,023
0,2662	200	0,121	0,016	0,291	0,040	0,702	0,097
0,4209	300	0,182	0,040	0,436	0,097	1,037	0,232
0,5925	400	0,244	0,077	0,578	0,184	1,359	0,438
0,7836	500	0,306	0,129	0,717	0,308	1,665	0,728
0,9971	600	0,367	0,201	0,852	0,476	1,956	1,116
1,2363	700	0,428	0,297	0,982	0,695	2,228	1,617
1,5053	800	0,488	0,420	1,107	0,977	2,480	2,251
1,8047	900	0,545	0,575	1,223	1,326	2,709	3,029
2,1260	1000	0,597	0,758	1,327	1,736	2,907	3,933
2,4677	1100	0,645	0,971	1,418	2,206	3,076	4,956
2,8292	1200	0,688	1,212	1,498	2,734	3,220	6,095
3,2096	1300	0,726	1,481	1,568	3,317	3,342	7,344
3,6082	1400	0,759	1,777	1,628	3,954	3,444	8,697
4,0247	1500	0,789	2,099	1,679	4,643	3,530	10,15

Аналізуючи значення бічних зміщень кулі, приведених в таблиці 5, під дією бічного вітру, можна стверджувати, що не має лінійної залежності між величиною швидкості вітру та величиною бічного зміщення кулі.

### Висновки

Теоретичні дослідження впливу супутнього або зустрічного вітру на кінематику руху кулі підтвердили результати, отримані експериментально. Встановлено, що швидкість вітру несуттєво впливає при стрільбі на малу віддаль, однак при стрільбі на велику віддаль швидкість вітру необхідно враховувати. Супутній вітер сприяє дальності та збільшує тривалість польоту кулі, а зустрічний – зменшує дальність та тривалість її польоту.

Однак теоретичні дослідження впливу бічного вітру на кінематику кулі на окремих ділянках її руху мають кількісні розбіжності з результатами, що отримані експериментально. Тому числові значення величин бічного зміщення кулі на цих ділянках під

дією бічного вітру, приведені в [5], викликають сумнів.

Величина бічного зміщення кулі під дією бічного вітру нелінійно залежить від величини його швидкості. Вплив бічного вітру необхідно враховувати при стрільбі по цілях. Знання функціональних залежностей величин лобового опору повітря рухові кулі та бічної сили, ініційованої дією бічного вітру, дозволяє автоматизувати визначення поправок при стрільбі з СВД.

### Список літератури

1. Вентцель Д.А. *Внешняя баллистика: Часть первая* / Д.А. Вентцель, Я.М. Шапиро. – М.: Госуд. издат. Оборонной промышленности, 1939. – 209 с.
2. Грабчак В.І. *Аналіз існуючих та перспективних методів визначення сили опору повітря руху снарядів* / В.І. Грабчак, С.В. Бондаренко. – Львів: НАСВ. – 2013. – Вип. 2.(9). – С. 13-19.
3. Дмитриевский А.А. *Внешняя баллистика: учебник для студентов вузов* / А.А. Дмитриевский, Л.Н. Лысенко. – М.: Машиностроение, 2005. – 608 с.
4. Ефремов А.К. *Аппроксимация закона сопротивления воздуха 1943 года* / А.К. Ефремов // Наука

и образование. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2013. – Вып. 10. – С. 269-282.

5. Таблицы стрельбы по наземным целям из стрелкового оружия калибров 5,45 и 7,62 мм / – М.: Воениздат. – 1977. – 263 с.

6. Настанова зі стрілецької справи 7,62-мм снайперська гвинтівка Драгунова (СГД). – Київ, 2006. – 90 с.

**Рецензент:** д.ф.-м.н., проф., М.Г. Стащук, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів.

### **Влияние ветра на внешнюю баллистику пули, выпущенной из СВД**

П.П. Ткачук, Л.Д. Величко, И. В. Горчинский

*В работе рассматривается динамика движения пули в воздухе, выпущенной из снайперской винтовки Драгунова. Считается, что на нее действуют сила лобового сопротивления воздуха, вес пули и сила бокового ветра. Сила лобового сопротивления зависит от коэффициента аэродинамичности, площади поперечного сечения пули, удельной массы и скорости звука в воздухе, скорости сопутствующего или встречного ветра, скорости пули и двух безразмерных коэффициентов, которые имеют различные значения при надзвуковой и дозвуковой скоростях. Сила бокового ветра пропорциональна максимальной площади продольного сечения пули, удельной массе воздуха, разнице скоростей ветра и бокового смещения пули, которая вознесена к определенной степени. Между теоретическими и экспериментальными результатами кинематических параметров пули имеется незначительное расхождение. Но при учете бокового ветра имеется значительное расхождение, если координата точки обнуления траектории более 700 метров. Проведением теоретической проверки экспериментальных значений установлено, что на отдельных участках движения пули значения средней скорости ее бокового смещения противоречат законам механики.*

**Ключевые слова:** внешняя баллистика пули, сила лобового сопротивления воздуха, влияние ветра.

### **Wind influence on the exterior ballistics of the bullet movement from the SVD**

P. Tkachuck, L. Velychko, I. Gorchynskiy

*In the paper the author investigate the dynamics of the movement of the bullet of the cartridge LPS in the air released from the sniper rifle Dragunov. The main influence on the bullet movement in the air has the force of the frontal air resistance, the bullet's mass and the force caused by the action of the counter wind on the bullet. It is assumed that the force of the frontal air resistance depends on the factor described the aerodynamics properties of the bullet, the cross-section of the bullet, the density of the air and the sound velocity in the air, the velocity of the accompanying or opposite wind and the bullet's velocity. In addition, its functional relationship contain two dimensionless coefficients that have different values in supersonic and subsonic velocity of the bullet and are determined using the results of experimental studies. The action of the accompanying or opposite wind affects the value of the force of the frontal air resistance of the bullet's movement and is taken into account through the corresponding force expression. There is a slight difference between the theoretical and experimental results of the kinematic parameters of the bullet. The value of the force caused by the action of the crosswind is proportional to the maximum area of the longitudinal section of the bullet, the air density, and the difference of the wind velocities and cross drift of the bullet, which is elevated to a certain degree. The values of the coefficient of proportionality and degree depend on the nature of the air movement – laminar or turbulent. Analyzing the results of theoretical calculations, we can state that the velocity of the cross drift of the bullet is constantly increasing; the value of the cross drift of the bullet increases according to the nonlinear law. In addition, there are significant differences between the results of theoretical and experimental studies, if the coordinate of the point of zeroing of the trajectory is greater than 700 meters. During the theoretical verification of experimental values, it was established that the value of the average velocity of its cross drift on certain sections of the bullet movement contradicts the laws of mechanics. Consequently, certain values of experimental studies, given in the shooting tables, cause distrust.*

**Keywords:** exterior ballistics of the bullet, the force of the frontal air resistance, wind influence.