

## Акустичні прилади та системи

УДК 534.88

DOI [10.20535/2312-1807.2017.22.1.79761](https://doi.org/10.20535/2312-1807.2017.22.1.79761)Козерук С. О., к.ф.-м.н., OrcID [0000-0003-2400-3954](https://orcid.org/0000-0003-2400-3954)e-mail: [so.kozeruk@aae.kpi.ua](mailto:so.kozeruk@aae.kpi.ua)Мазніченко Д. В., OrcID [0000-0003-1258-7518](https://orcid.org/0000-0003-1258-7518)e-mail: [mazik16@ukr.net](mailto:mazik16@ukr.net)

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ДЖЕРЕЛА ПОСТРІЛУ ПО АКУСТИЧНИМ ХВИЛЯМ

В статті розглянуто питання локалізації джерела пострілу двома мікрофонами по параметрам збуджених акустичних хвиль. Кут на джерело визначається по різниці приходу на мікрофони акустичної дульної хвилі, а відстань – за алгоритмом в якому враховано тиск акустичної ударної хвилі. Приведені теоретичні розрахунки та експериментальні дані визначення координат джерела.

Бібл. 3, рис.3.

**Ключові слова:** джерело пострілу; акустична дульна хвиля; акустична ударна хвиля; кут Маха; тиск ударної хвилі; координати джерела.

**Вступ.** Швидкість вильоту кулі в сучасній стрілецькій зброї перевищує швидкість звуку. При цьому виникає дві акустичні хвилі [1]. Одна з яких – дульна, створюється за рахунок згоряння порохового заряду та розповсюджується в усіх напрямках із швидкістю звуку  $c$ . (За нормальних атмосферних умов  $c = 340$  м/с). Звуковий тиск дульної хвилі у напрямку пострілу, по оцінці [2], перевищує тиск у протилежному напрямку на 20 дБ, а частотний діапазон лежить в області нижніх частот і залежить від калібру кулі.

Акустична ударна хвиля створюється кулею яка рухається з надзвуковою швидкістю  $V > c$ . Фронт хвилі має вигляд конуса, що розповсюджується за кулею у напрямку від траєкторії кулі зі швидкістю звуку. Конус ударної хвилі (рис.1) має внутрішній кут  $\theta$ , який називається кутом Маха та визначається числом Маха  $M$ :

$$\theta = \arcsin\left(\frac{1}{M}\right); M = V / c. \quad (1)$$

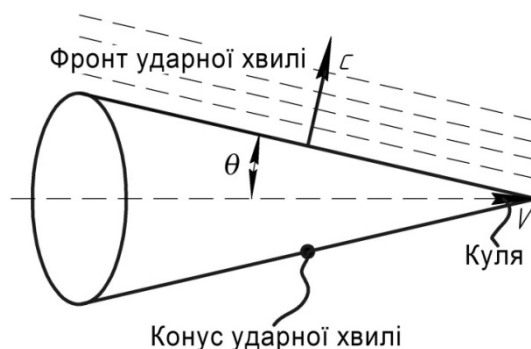


Рис.1.Схема формування ударної хвилі

Кут Маха змінюється в залежності від швидкості кулі. При дуже великій швидкості кулі число Маха велике, і кут Маха малий, ударна хвиля

поширюється майже перпендикулярно траєкторії кулі. Наприклад, для кулі, що летить зі швидкістю 900 м/с (для автомата АК-74 калібр кулі



5,45 мм), число Маха  $M=2,64$ , а кут Маха  $\theta \approx 22^\circ$ . З іншого боку, якщо швидкість кулі всього лише трохи вище швидкості звуку, число Маха приблизно дорівнює одиниці, кут Маха  $\theta_M \approx 90^\circ$  і ударна хвиля поширюється вздовж траєкторії кулі.

Акустична ударна хвиля, створена кулею, дуже швидко зростає до максимуму, створюючи надмірний тиск  $P_{\max}$ , за яким слідує сильне розрядження. Так як ударна хвиля поширюється нелінійно, коливання тиску формують N-профільну хвилю тиску з різким зростанням, лінійним спаданням до мінімуму і різким поверненням в норму [3]. Максимальне значення тиску  $P_{\max}$  та часовий інтервал  $T$ , за який тиск змінюється від максимуму (надлишкового тиску) до мінімуму (розрядження), залежить від геометрії кулі, числа Маха, відстані до траєкторії та атмосферних умов. Характеристики ударної хвилі теоретично обґрунтовані в роботах [3], [4] та записуються виразами:

$$T = \frac{1,82Mr^{1/4} d}{c(M^2 - 1)^{3/8} l^{1/4}}, \quad (2)$$

$$P_{\max} = \frac{0,53P_0(M^2 - 1)^{1/8} d}{r^{3/4} l^{1/4}}. \quad (3)$$

де  $r$  – віддалення від траєкторії кулі;  $d$  – діаметр кулі;  $l$  – довжина кулі;  $P_0$  – атмосферний тиск.

Куля сповільнюється через тертя об повітря і переходу кінетичної енергії в ударну хвилю. Так як швидкість кулі зменшується в напрямку від джерела пострілу, кут Маха ударної хвилі зростає від його початкового значення (в момент вильоту кулі) до значення, рівного  $90^\circ$ . В подальшому ударна хвиля зникне через те, що куля знизить швидкість до швидкості нижче швидкості звуку. В роботі [5] приведені викладки, які були взяті для розрахунку швидкості кулі калібру 5,45 мм автомату АК-74.

**Розробка алгоритму локалізації.** Для локалізації джерела пострілу розглянемо схему представлену на рис. 2. Джерело пострілу знаходиться в точці  $D$ . Траєкторія кулі  $DB$ . Пеленгування ведеться в точці  $C$  двома мікрофонами  $M_1, M_2$  розташованими на базі довжиною  $h$ , нормаль до якої  $n$  паралельна траєкторії кулі. Задача полягає в знаходженні відстані  $R$  та кута  $\alpha$  до джерела пострілу.

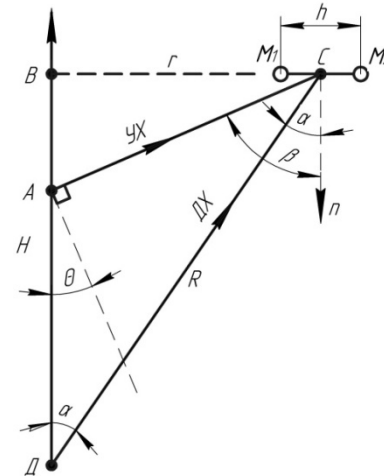


Рис.2. Схема локалізації джерела пострілу

Кут  $\alpha$  знаходиться по часу затримки дульної хвилі  $\Delta T_{DX}$  між двома мікрофонами, відомими довжиною бази  $h$  та швидкості звуку  $c$ :

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{c\Delta T_{DX}}{h}\right). \quad (4)$$

На мікрофони приходять спочатку ударна хвиля (UX), а потім дульна хвиля (DX). Ударна хвиля досягає точки спостереження в момент часу  $T_{UX}$ :

$$T_{UX} = DA/v + AC/c. \quad (5)$$

Дульна хвиля досягне точки  $C$  в момент часу  $\Delta T_{DX}$ :

$$T_{DX} = DC/c. \quad (6)$$

Різниця в часі  $\Delta T$  між приходом UX та DX до мікрофонів визначається траєкторіями та швидкістю руху акустичної хвилі та кулі:

$$\Delta T = T_{DX} - T_{UX} = DC/c - (DA/v + AC/c). \quad (7)$$

Після проведення простих геометричних перетворень, ввівши позначення сторін трикутника у відповідності до рис.2, запишемо:

$$\Delta T = \frac{R}{c} - \frac{R \cos \alpha}{v} + \frac{r \operatorname{tg} \theta}{v} - \frac{r}{c \cdot \cos \theta}. \quad (8)$$

Звідки знаходимо відстань  $R$ :

$$R = \frac{\Delta T M c \cos \theta + r \left(\frac{M^2 - 1}{M}\right)}{(M - \cos \alpha) \cos \theta}. \quad (9)$$

Кут  $\theta$  знаходимо із геометричних міркувань (рис.3), визначивши кутову координату  $\beta$  по часу затримки ударної хвилі  $\Delta T_{UX}$  між двома мікрофонами:

$$\theta = 90^\circ - \beta; \beta = \arcsin\left(\frac{c\Delta T_{yx}}{h}\right). \quad (10)$$

Віддалення від траєкторії кулі  $r$  знаходимо з (3) по розрахованому числу Маха (1), виміряним значенням атмосферного  $P_0$  та максимального тиску  $P_{\max}$ :

$$r = \left[\frac{0,5P_0}{P_{\max}}\right]^{4/3} (M^2 - 1)^{1/6} \frac{d^{4/3}}{l^{1/3}}. \quad (11)$$

**Експеримент.** Для апробації алгоритму був проведений експеримент по визначенню координат джерела пострілу. Постріли велися з автоматичної зброї АК-74 з калібром кулі 5,45 мм. Пристрій пеленгування складався з двох вимірювальних мікрофонів

ІСР 130D20, підключених до спеціалізованого модулю «ZLab» та персонального комп'ютеру (ПК). Програмне забезпечення «ZLab» дозволяло вести запис акустичних сигналів по двом каналам з частотою дискретизації 50 кГц. Мікрофони були закріплені на штативі з базою  $h=0,34$  м, що забезпечило похибку вимірювання кута менше двох градусів. Штатив послідовно встановлювався в контрольних точках з координатами  $(H, r)$ . Акустичні сигнали від окремих пострілів записувались на ПК. Атмосферні умови: температура повітря  $+20^\circ\text{C}$ ; швидкість звуку  $c=340$  м/с; атмосферний тиск  $P_0=100925$  Па. Результати замірів та проміжні результати розрахунків усереднені по декільком пострілам та приведені в таблиці 1.

Таблиця 1.

Параметри акустичних хвиль та деякі проміжні результати розрахунків

$(H; r)$ , м	$\Delta T_{yx}$ , мс	$\beta$ , град	$\theta$ , град	$M$	$\Delta T_{dx}$ , мс	$\alpha^*$ , град	$\Delta T$ , мс	$P_{\max}$ , Па
10;5	0,90	64	26	2,3	0,41	24	6	250
50;10	0,88	62	28	2,13	0,24	11	63	130
100;15	0,85	58	32	1,9	0,19	8,5	137	90

В таблиці 2 представлені геометрично розраховані та отримані експериментально (\*) координати джерела пострілу.

**Аналіз результатів досліджень.** Виміряна кутова координата  $\alpha^*$  менша від геометрично розрахованої величини у середньому на  $2,5^\circ$

Цей результат вказує на наявність системної похибки експерименту, яка полягає у відхиленні нормалі акустичної бази від траєкторії кулі на  $2,5^\circ$ . Системна похибка збільшила експериментальне значення кута Маха, та зменшила значення чисел  $M$  (табл.1) в порівнянні з величинами, які не складно отримати з графіку (рис.2).

Таблиця 2.

Геометрично розраховані та експериментально отримані координати джерела пострілу.

$R$ , м	$R^*$ , м	$r$ , м	$r^*$ , м	$\alpha$ , град	$\alpha^*$ , град
11,2	9,8	5	4,4	26	24
51	56,5	10	9,9	14	11
101,1	109,2	15	15,4	11	8,5

При визначенні кутових координат (4) та (10) треба враховувати похибку вимірювання часо-

вих інтервалів, яка визначається частотою дискретизації запису акустичних файлів та стано-



виль 50 кГц. Похибка розрахунку кутових координат для прийнятої акустичної бази становить  $1,14^\circ$ , що приводить до похибки визначення числа  $M$  приблизно в 0,1.

Атмосферні артефакти були мінімізовані точними даними по температурі, тиску та відсутності вітру.

**Висновок.** В роботі розглянуто окремий випадок локалізації джерела пострілу коли траєкторія кулі та нормаль до акустичної бази орієнтовані паралельно. Прийнята схема локалізації спростила розрахунковий алгоритм та експериментальні дослідження.

Отримані результати вимірювання відстані та кутової координати джерела пострілу добре узгоджуються з геометричними розрахунками. Похибка вимірювання кутової координати визначається системною і апаратною похибками та суттєво впливає на точність вимірювання відстані.

Визначені недоліки алгоритму та встановлені вимоги до вимірювання часових інтервалів. Алгоритм повинен бути інваріантним до положення мікрофонів відносно траєкторії кулі. Похибку вимірювань бажано зменшити за рахунок збільшення частоти дискретизації запису акустичних файлів.

*Надійшла до редакції 12 жовтня 2016 р.*

### Література

1. Dumond J. A determination of the wave forms and laws of propagation and dissipation of ballistic shock waves / J. Dumond, E. Cohen, W. Panofsky, E. Deeds // J. Acoust. Soc. Am., 1946. – Vol. 18. – P. 97-118. DOI: [10.1121/1.1916347](https://doi.org/10.1121/1.1916347)
2. Maher R.C. Directional aspects of forensic gunshot recordings / R.C. Maher, S.R. Shaw // 39th Conf., Audio Forensics – Practices and Challenges, Audio Eng. Soc., June 01, 2010, Hillerød, Denmark. – Hillerød, 2010. – P. 1-6.  
URL: [http://www.montana.edu/rmaher/publications/maher\\_aesconf\\_0610\\_1-6.pdf](http://www.montana.edu/rmaher/publications/maher_aesconf_0610_1-6.pdf)
3. Bedard J. Ferret, a small arms' fire detection system: Localization concepts / J. Bedard, S. Pare // SPIE. – Vol. 5071. – P. 497–509. DOI: [10.1117/12.498503](https://doi.org/10.1117/12.498503)
4. Stoughton R. Measurements of Small Calibers Ballistic Shock Waves in Air / R. Stoughton // J. Acoust. Soc. Am., 1997. – Vol. 102 (2), Pt. 1. – P. 781-787. DOI: [10.1121/1.419904](https://doi.org/10.1121/1.419904)
5. Аливердиев А.А. Расчет зависимостей дистанции выстрела и скорости пули [Електронний ресурс] / Аливердиев А.А // Федерация Судебных Экспертов. – Режим доступа: <http://sud-expertiza.ru/library/raschet-zavisimostey-distantcii-vystrela-i-skorosti-puli/>. Дата звертання: 06.10.2016

УДК 534.88

**Козерук С. А.**, к.ф.-м.н., OrcID [0000-0003-2400-3954](https://orcid.org/0000-0003-2400-3954)

e-mail: [so.kozeruk@aae.kpi.ua](mailto:so.kozeruk@aae.kpi.ua)

**Мазніченко Д. В.** OrcID [0000-0003-1258-7518](https://orcid.org/0000-0003-1258-7518)

e-mail: [mazik16@ukr.net](mailto:mazik16@ukr.net)

Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКА ВЫСТРЕЛА ПО АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЕ

*В статье рассмотрены вопросы локализации источника выстрела двумя микрофонами по параметрам возбужденной акустической волны. Угол на источник определяется по разнице прихода акустической дальной волны на микрофоны, а расстояние – по алгоритму в котором учтены как временные так и физические характеристики акустической волны. Приведены теоретические расчеты и экспериментальные данные определения координат источника.*

*Библ. 3, рис.3.*

**Ключевые слова:** источник выстрела; акустическая дальняя волна; акустическая ударная волна; угол Маха; давление ударной волны; координаты источника.



UDC 534.88

**Kozeruk S. O.**, Ph.D., OrcID [0000-0003-2400-3954](https://orcid.org/0000-0003-2400-3954)

e-mail: [so.kozeruk@aae.kpi.ua](mailto:so.kozeruk@aae.kpi.ua)

**Maznichenko D. V.**, OrcID [0000-0003-1258-7518](https://orcid.org/0000-0003-1258-7518)

e-mail: [mazik16@ukr.net](mailto:mazik16@ukr.net)

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

## DETERMINING OF SOURCE'S COORDINATES OF SHOT BY MEAN OF ACOUSTIC WAVES

*The article discusses the localization of the source of the shot by two microphones using the parameters of the excited acoustic wave. The direction of angle on the source is determined by the difference in arrival of the acoustical muzzle wave on microphones, and the distance – the algorithm which takes into account both the time and the physical characteristics of the acoustic wave. The theoretical calculations and experimental data of determining the source of origin.*

*Referense 3, Figures 3.*

**Keywords:** *the source of the shot, muzzle acoustic wave, acoustic shock wave, Mach angle, pressure shock wave, source coordinates.*

### References

- [1]. DuMond, J. W. M., E. Richard Cohen, Panofsky, W. K. H., & Deeds, A. E. (2005). A Determination of the Wave Forms and Laws of Propagation and Dissipation of Ballistic Shock Waves. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 18(1), 97-118. DOI: [10.1121/1.1916347](https://doi.org/10.1121/1.1916347)
- [2]. Robert C. Maher And Steven R. Shaw, . *DIRECTIONAL ASPECTS OF FORENSIC GUNSHOT RECORDINGS*. Paper presented at AES 39th International Conference, Hillerød, Denmark. Retrieved from [http://www.montana.edu/rmaher/publications/maher\\_aesconf\\_0610\\_1-6.pdf](http://www.montana.edu/rmaher/publications/maher_aesconf_0610_1-6.pdf)
- [3]. Bedard, J., & Pare, S. . *Ferret: a small arms fire detection system: localization concepts*. Paper presented at Sensors, and Command, Control, Communications, and Intelligence (C3I) Technologies for Homeland Defense and Law Enforcement II, Orlando, FL. DOI: [10.1117/12.498503](https://doi.org/10.1117/12.498503)
- [4]. Stoughton, R. (1998). Measurements of small-caliber ballistic shock waves in air. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 102(2), 781-787. DOI: [10.1121/1.419904](https://doi.org/10.1121/1.419904)
- [5]. Aliverdiev, A. A. . Calculating dependencies shot distance and speed of a bullet.. , Retrieved from <http://sud-expertiza.ru/library/raschet-zavisimostey-distantsii-vystrela-i-skorosti-puli/>

