

УДК 623.4.068.4

МОДЕЛЮВАННЯ ПОТОКУ ПОРОХОВИХ ГАЗІВ ПЕРШОЇ КАМЕРИ ГЛУШНИКУ ШУМУ ПОСТРІЛУ СТРІЛЕЦЬКОЇ ЗБРОЇ

Котляр Д.В., к.т.н.,

yardnight@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1718-753X*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
(м. Миколаїв, Україна)*

Подуються результати дослідження модельованого процесу витікання порохових газів з дульної частини гвинтівки у порожнину глушника шуму пострілу, яке проводилося за допомогою пакетів обчислювальної газодинаміки. Метою дослідження є виявлення впливу геометричних особливостей конструкції глушника на його редуційну ефективність. З огляду на те, що масогабаритні параметри глушника мають практичний вплив на його зручне використання, намагання зменшити його розмір зберігаючи редуційну ефективність спонукає дослідників до пошуку оптимальних значень його геометричних параметрів виявляючи залежності зміни форми внутрішніх порожнин глушника на плинність газодинамічних процесів в його редуційних камерах. Предметом дослідження є розподіл динамічного тиску потоку в першій камері глушника.

У наявній роботі було прийнято виділити геометричний параметр довжин першої камери у якості керуючого параметра. Змінюючи довжину першої камери було проведено ряд газодинамічних розрахунків робочого потоку у тому числі визначався динамічний тиск у вихідному отворі глушника, для оцінки його ефективності. У ході досліджень було виявлено ефект редуції розширення потоку порохових газів шляхом інтерференції окремих його периферійних шарів у ядро потоку після відбиття їх від поверхонь першої редуційної камери. Редуційна спроможність камери з урахуванням наведеного ефекту інтерференції залежить від геометричної форми утвореного фронту ядра потоку, який приймає форму конічної поверхні.

Проведені дослідження виявили, що зміна форми цієї поверхні фронту потоку порохових газів суттєво впливає на редуційну здатність першої камери глушника. Шляхом зміни довжини першої камери можна отримати дві форми поверхні фронту потоку. При достатньо довгій камері ми маємо повністю сформований конус фронту. У іншому випадку, якщо зменшувати довжину першої камери, можемо спостерігати появу поверхні зрізаного конусу фронту. Впливаючи на форму конусу фронту потоку шляхом зміни довжини першої камери глушника вдалося оптимізувати редуційну здатність першої камери.

Ключові слова: глушник шуму пострілу, редуційна мембрана,

розширення потоку, редуція тиску, інтерференція потоків.

Постановка проблеми. В сучасному стані розробок глушників шуму стрілецької зброї відзначається значний прогрес. Конструктивна типологія глушників розвинута настільки, що включає в себе численні принципові схеми ефективного глушіння звуку. Основними напрямками розвитку цих схем є об'ємний спосіб глушіння та відхиляюча дія. За останні 20 років дослідники зосередили свою увагу на поєднанні цих напрямків, досягнувши значних результатів і підвищивши редуційну здатність глушників до рівня 25–29 дБ. Цей рівень забезпечує безпеку органів слуху бійців, але не завжди вистачає для задоволення потреб у маскуванні. Окрім маскувальної функції, глушник (пристрій) повинен мати оптимальні масо-габаритні показники, що забезпечуватимуть його зручне використання. З точки зору виробництва, глушник має бути простим у виготовленні та високорентабельним, що підтримуватиме інтерес виробників до зменшення масо-габаритних показників з метою збільшення прибутку. Отже, виникає питання про можливість зниження масо-габаритних показників глушника, зберігаючи його функціональну ефективність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню процесу пострілу приділено достатньо значну частину наукових робіт, що висвітлюють газодинамічні процеси швидкоплинних явищ. Серед вітчизняних шкіл тематичного дослідження треба виділити науково-виробничу компанію "ІМКАС", Інститут технічної механіки НАНУ, ТОВ "AWS", які займаються дослідження ефекту Гартмана – Шпренгера, з конічними та сферичними мембранними елементами [1,2]. Також певні дослідження проводяться в Одеському дослідному центрі ТОВ "Hamond", що досліджують течію газів у модифікаціях конструкції глушника винайдену Хайрем Максимом. Серед іноземних компаній досить відомі виробники: GemTech [3], Silencer Co [4], що проводять дослідження з суцільно-корпусними конструкціями глушників для автоматичної стрілецької зброї.

Формулювання цілей статті. Метою роботи є проведення дослідження з метою визначення впливу геометричних особливостей конструкції глушника на його редуційну ефективність, що впливає на інтенсивність звукового фронту під час пострілу. Основним предметом дослідження є аналіз розподілу динамічного тиску в потоці газу в першій камері глушника.

Основна частина . Розглядається проблематика глушіння шуму під час пострілу як динамічного та швидкоплинного явища. З метою систематизації проблем, пов'язаних з підвищенням редуційних характеристик глушника, пропонується поділити їх за категорією часу виникнення на три основні періоди гасіння шуму. Перший період включає процес пікового гасіння потенціальної енергії потоку до вильоту газів з глушника. Другий період відноситься до процесів заповнення глушника

пороховими газами та збільшення статичного тиску всередині глушника. Третій період відображає процес падіння ефективності глушника.

У зв'язку з широким спектром проблематики даного дослідження, ми обмежимося розглядом лише першого періоду гасіння шуму. У цьому контексті, вивчаючи перший період, необхідно висвітлити наступну проблему. Факел потоку порохів газів, що виходить зі ствола, має значну довжину високо-потенційної зони, на яку не можна ефективно вплинути за допомогою конструктивних елементів глушника, таких як пластини або мембрани для відхилення потоку. Тим не менш, гасіння тиску в перших камерах, де він досягає свого максимуму, визначає тенденцію глушіння шуму в наступних камерах, узгоджуючи заповнення їх статичним тиском і кінетичними характеристиками потоку.

Є метод редукації тиску, який ґрунтується на використанні вторинних хвиль інтерференції потоку, що виникають після відбиття фронтальної хвилі порохів газів від стінок камери глушника. Першу камеру зроблено порожньою на певну довжину, вона відокремлена від наступної камери фігурною мембраною у формі конуса або клину. Механізм впливу інтерференції працює таким чином: відомо, що периферійні шари потоку порохів газів рухаються швидше, ніж центральна частина факелу, відома як ядро потоку, через адіабатне розширення. Це призводить до формування диску Маху [5, 6]. Отже, периферійний потік випереджає ядро та першим досягає поверхні фігурної мембрани глушника, де змінює свій напрям на зворотний. Потім, низько потенційний розігнаний потік, відбиваючись від мембрани, входить у високо потенційний потік ядра, зменшуючи його осьову швидкість та сприяючи його додатковому радіальному розширенню. Цей явище взаємного проникнення швидкого потоку з меншим потенціалом, але вищим кінетичним станом, у високо потенційний потік з меншими кінетичними показниками називається ефектом інтерференції потоку.

Дослідження проводиться за допомогою пакету обчислювальної газодинаміки використовуючи наступні параметри розрахунку:

- тип розрахунку за основою: Pressure-Based.
- тип розрахунку за часом: Transient.
- розрахунковий простір: 2D space: Planar.
- модель розрахунку: Energy, SST k-omega.

У якості робочого агента було взято повітря, як ідеальний газ з кусково-поліноміальною залежністю зміни теплоємності від температури газу);

Граничні умови розрахунку:

На вході:

$$P_0^{tot} = 610.99 \times 10^5 \text{ Па}; P_0^{st} = 306 \times 10^5 \text{ Па}; T_0^{tot} = 1639 \text{ К}.$$

У зв'язку з тим, що об'єм порохів газів обмежений, то тиск та температура при моделюванні процесу не є статичними характеристиками,

а отже доцільно провести експеримент з дослідження зміни цих характеристик у часі. Далі подаються функції, що визначають ці залежності наведених характеристик у часі[7]:

$$P_t^{tot} = P_0^{tot} \cdot e^{-b \cdot t}, \quad (1)$$

$$P_t^{st} = P_0^{st} \cdot e^{-b \cdot t}, \quad (2)$$

$$T_t^{tot} = T_0^{tot} \cdot e^{-b \cdot t}, \quad (3)$$

де t час процесу.

Наведені функції були запропоновані Бравінім для визначення характеристик тиску у дульному зрізі [1]. Формули уточнення коефіцієнта b також надаються у наведеному джерелі [1], але автором окремо було проведено дослідження, яке дозволило уточнити розрахунок цього коефіцієнта. Автором пропонується залежність (4), що реалізувала достатню точність обумовлення процесу редукції параметрів потоку порохових газів:

$$b = \frac{\alpha \cdot \theta_0}{\beta + \gamma \cdot t}, \quad (4)$$

де θ_0 – дульний параметр потоку (P_0^{tot} , P_0^{st} , T_0^{tot}) у момент вильоту кулі зі стволу, одиниці вимірювання в Атмосферах та Кельвінах; α – емпіричний коефіцієнт, що корегує швидкість редукції; β – інтегруючий коефіцієнт, що корегує пологість процесу; γ – фактор впливу часу на зміну характеристик; t – момент часу, с.

Як видно з наведеної формули (4) залежність було уніфіковано для ви-значення редукції параметрів повного і статичного тиску та параметру статичної температури у часі, що є необхідними для "безкульового" моделювання пострілу при дослідженнях зовнішньої балістики.

Провівши дослідження балістики для калібру .338 та проаналізувавши зняті графіки редукції цільових характеристик було отримано шукані коефіцієнти формули (4) з наступними значеннями:

- для повного тиску: $\alpha = 0.9$, $\beta = 0.38$, $\gamma = 120$;
- для статичного тиску: $\alpha = 0.9$, $\beta = 0,28$, $\gamma = 25$;
- для статичної температури: $\alpha = 0.5$; $\beta = 2.4$; $\gamma = 500$.

Повертаючись до дослідження потоку порохових газів у першій камері, на виході з глушника використовувалися наступні граничні умови навколишнього простору:

- тиск навколишнього середовища – $P_{st} = 1 \text{ атм}$;
- температура навколишнього середовища $T_{tot} = 300 \text{ К}$.

Наступні наведені параметри визначають точність та збіжність розрахунків у програмному пакеті *FEM* аналізу:

Схема розрахунку: Couple;

- Градієнт: на основі методу найменших квадратів;
- Тиск: другий порядок по схемі з різницями проти потоку;

- Щільність: другий порядок по схемі з різницями проти потоку;
- Моменти: другий порядок по схемі з різницями проти потоку;
- Турбулентна кінетична енергія: другий порядок по схемі з різницями проти потоку;
- Перехідний режим: перший порядок точності неявний у часі.

Контрольні значення розрахунку:

- Число Куранта 0,5
- Фактори релаксації: момент 0,5; тиск 0,5;
- Допоміжні фактори релаксації: густина 1.0, сила 1.0, ТКЕ 0.8, коефіцієнт дисипації 0.3;
- Турбулентна в'язкість 1.0.

Початкові умови моделювання динамічного процесу: метод – стандартна ініціалізація; відносні показники – відносно чарунок; повний тиск навколишнього середовища – 1атм, повна температура – 300К.

Розрахунок проводився на 300 тис. чарунок тетрагональної сітки. З постійним кроком за часом, що обраний за величиною $1e-08$. Критерій похибки сходження розрахунку $1e-04$.

Розрахунок був зупинений при досягненні $7.5e-04$ с загального дослідного часу процесу проходження порохових газів крізь глушник.

Результати дослідження підтвердили, що розширюючись у периферійних зонах, потік порохових газів накопичує радіально спрямовану кінетичну енергію та відбивається від внутрішньої поверхні циліндричного кожуха глушника, що створює ефект радіально-спрямованої інтерференції. Це призводить до відхилення потоку у доцентровому напрямку та формування конусоподібної структури факелу (рис.1).

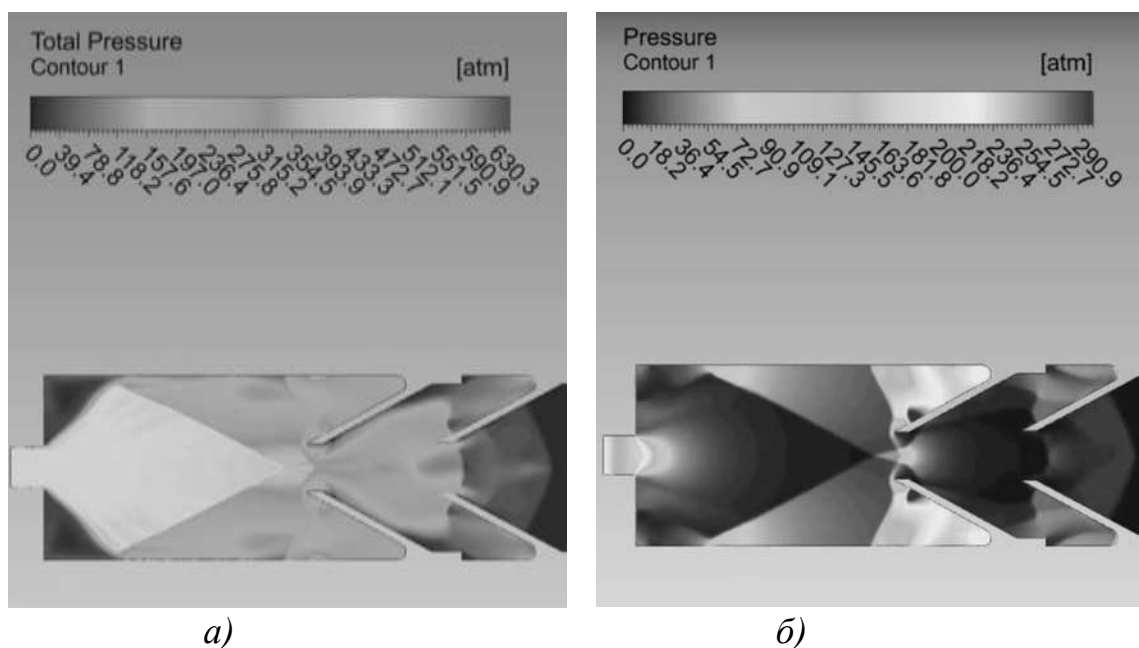


Рис.1. Формування конуса факелу в епюрах повного *а)* та статичного *б)* тисків

Дослідження також показали, що при варіюванні довжини першої камери можна підвищити ефективність редукції тиску за рахунок інтерференційної сили. Виявилося, що оптимальною довжиною камери є такою, яка утворює конус факелу де менша основа приблизно дорівнює діаметру кульового отвору або трохи більша за нього (див. рис.2). За таких умов периферійний потік не проходить до наступної камери до відбиття його від фігурної мембрани відокремлення першої камери, це забезпечує більш ефективну редукцію тиску між камерами. Зменшення довжини першої камери до утворення факелу форми усіченого конуса з діаметром меншої основи, приблизно рівним кульовому отвору, дозволило досягти подовження першого періоду редукції тиску до 40% без збільшення загальної довжини глушника (рис.3).

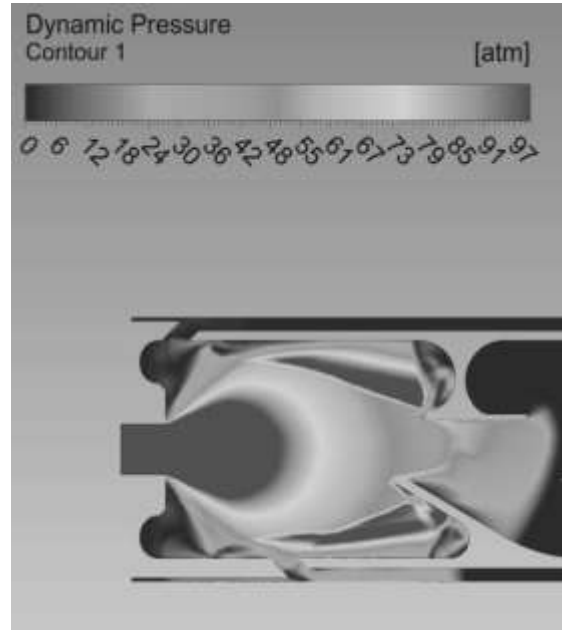


Рис.2. Зображення усіченого конуса факела в епюрах динамічного тиску

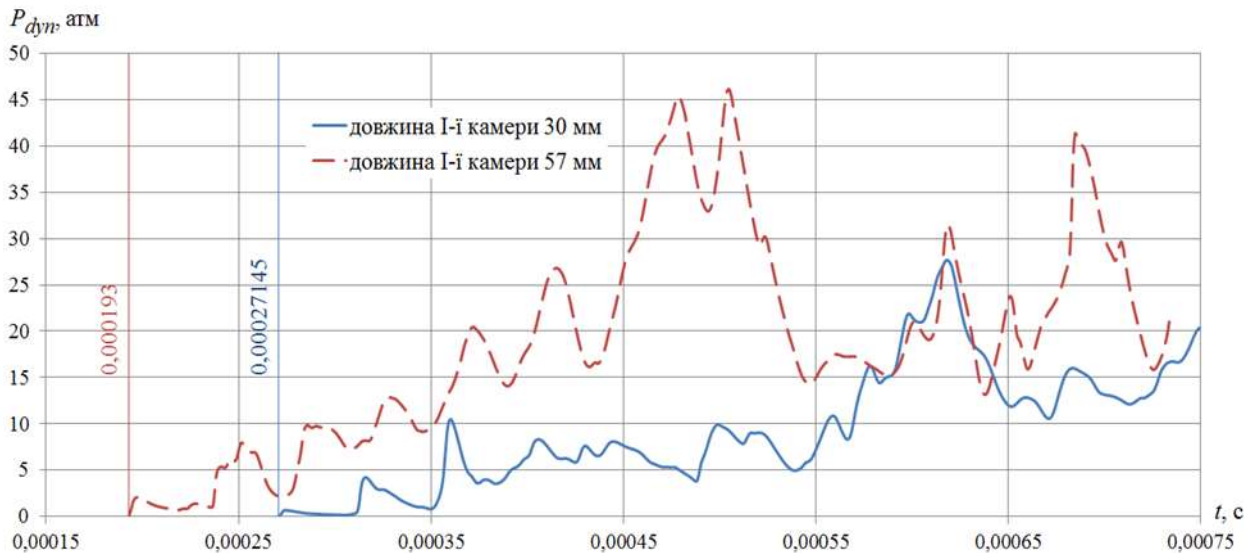


Рис.3. Порівняльний графік зміни динамічного тиску за часом у вихідному кульовому отворі глушника при формуванні усіченого (—) та повного конуса (- -) ядра факела

Однак, дослідження показали, що подальше скорочення довжини першої камери призводить до зменшення ефективності редукції тиску через недостатню довжину для повного розкриття факелу та відсутність умов для виникнення ефекту інтерференції. В таких випадках виявлено, що необхідно подовжувати розширювальну камеру до другої мембрани, щоб

створити умови для виникнення ефекту інтерференції, подібно до глушника з довгою першою камерою.

Таким чином, проведені дослідження надали наукове обґрунтування та практичні висновки щодо оптимальних параметрів конструкції глушника, які забезпечують ефективне гасіння шуму шляхом використання інтерференційного ефекту та відбиття потоку порохових газів, що дозволяє зберегти їх у глушнику без додаткового збільшення ваги та складності конструкції.

Висновки. Результати дослідження підкреслюють важливість правильного розрахунку довжини першої камери при проектуванні глушника. Незалежно від конструкції глушника, редуційна ефективність першої камери має великий вплив на газодинамічні процеси пострілу, оскільки саме в цій камері відбувається інтенсивне розширення потоку та перетворення потенційної енергії в кінетичну енергію руху.

Шляхом підвищення ефективності використання ефекту інтерференції потоку було досягнуто збільшення періоду протікання порохових газів у глушнику (рис. 3). Це дозволило затримати потік у першій камері, створивши таким чином умови для керованого процесу редуції тиску у наступних розширювальних камерах. Затримка потоку у глушнику позначена секундами на діаграмі. Відповідно 135 мкс з довгою камерою та 271 мкс з короткою камерою.

У майбутніх дослідженнях планується вивчення другого періоду процесів заповнення глушника пороховими газами, а також підвищення статичного тиску у розширювальних камерах, що призводить до ефекту зменшення ефективної довжини глушника. Цей ефект має негативний вплив на глушники відхиляючого типу і вимагає подальшого дослідження для вирішення цієї проблеми.

Література

1. Ручное огнестрельное оружие бесшумного боя. Приборы снижения уровня звука выстрела для автоматов. Проектирование и экспериментальная отработка / Н. А. Коновалов, О. В. Пилипенко, А. Д. Скорик, Ю. А. Кваша, В. И. Коваленко. Днепропетровск : Институт технической механики НАНУ и НКАУ, 2008. 303 с.
2. Проектирование прибора малошумной стрельбы методами численного моделирования / В. Л. Бучарский, К. Ю. Добринская, В. В. Сербин, А. В. Сичевой. *Артиллерийское и стрелковое вооружение*. 2009. № 2. С. 3 – 7.
3. Pat. US 20140374189 A1 USA, Int. Cl.F41A 21/30. Sound Suppressor / N Blake Yong, Phillip H. Dater. – 14/311,526; Filed Jun. 23, 2014; Pub. Date: Dec 25, 2014. – 9p.
4. Pat. US 007856914B2 USA, Int. Cl.F41A 21/00. Noise suppressor / Jonathon Shults, Steven Michael Pappasa. – 12/324,623; Filed Nov. 26, 2008; Pub. Date: Dec 28, 2010. – 11p.

5. Шмидт Э.М., Горднер Р.Э., Фанслер К.С. Поле течения при вылете снаряда из ствола. "Аэрокосмическая техника", материалы из журналов Американского института аэронавтики и астронавтики, тематический выпуск. *Аэродинамика летательных аппаратов и их элементов*, том 3, № 4, апрель, 1985, С. 126 – 128.
6. Левинсон Я.И. Аэродинамика больших скоростей (газовая динамика). Под ред. Б.Я. Шумяцкого, М.: Государственное издательство оборонной промышленности. 1950, 352 с.
7. Інформаційні технології в моделюванні. *Матеріали II-ої всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених* (23-24 березня 2017 р., м. Миколаїв). Миколаїв: МНУ імені В.О. Сухомлинського, 2017. С.74–78.

SIMULATIVE MODELING THE FLOW OF GUNPOWDER GASES IN THE FIRST CHAMBER OF A FIREARM SUPPRESSOR

Dmytro Kotliar

Research results of the modeled process of powder gas outflow from the barrel of a rifle into the cavity of a noise suppressor are presented, which were conducted using computational gas dynamics software packages. The aim of the study is to determine the influence of geometric features of the suppressor design on its reduction efficiency. Considering that the size parameters of the suppressor have practical implications for its convenient use, the attempt to reduce its dimensions while maintaining reduction efficiency prompts researchers to search for optimal values of its geometric parameters by exploring the dependencies of internal cavity shapes on the flow dynamics in the suppressor's reduction chambers. The distribution of dynamic pressure in the first chamber of the suppressor is the subject of investigation.

In this work, the length of the first chamber was chosen as the control parameter. By varying the length of the first chamber, a series of gas dynamic calculations of the working flow were performed, including the determination of dynamic pressure at the outer opening of the suppressor to evaluate its effectiveness. During the research, the effect of reducing the expansion of the gas flow was observed by the interference of its individual peripheral layers in the flow core after reflecting from the surfaces of the first reduction chamber. The reduction capability of the chamber, taking into account the mentioned interference effect, depends on the geometric shape of the formed flow core front, which takes the form of a conical surface.

The conducted research revealed that the change in the shape of this flow core front surface significantly affects the reduction capability of the first chamber of the suppressor. By changing the length of the first chamber, two forms of the flow core front surface can be obtained. With a sufficiently long

chamber, a fully formed cone front is achieved. Otherwise, by reducing the length of the first chamber, the appearance of a truncated cone front surface can be observed. By influencing the shape of the flow core cone through the variation of the first chamber length, the reduction capability of the first chamber was successfully optimized.

Keywords: gunshot suppressor, reduction membrane, flow expansion, pressure reduction, flow interference.

References

1. Handheld Firearms for Silent Combat. Devices for Reducing Shot Noise Level for Rifles. Design and Experimental Development. (2008) / N.A. Konovalov, O.V. Pylypenko, A.D. Skoryk, Yu.A. Kvasha, V.I. Kovalenko. Dnepropetrovsk : Ynstytut tekhnicheskoi mekhaniky NASU and SSAU [in Ukrainian].
2. Designing a Low-Noise Firing Device using Numerical Modeling Methods. (2009) V. L. Bucharsky, K. Yu. Dobrinskaya, V. V. Serbin, A. V. Sichevoy. *Artylleryiskoe y strelkovee vooruzhenye*. 2009. No. 2. 3-7 [in Ukrainian].
3. Pat. US 20140374189 A1 USA, Int. Cl.F41A 21/30. Sound Suppressor / N Blake Yong, Phillip H. Dater. – 14/311,526; Filed Jun. 23, 2014; Pub. Date: Dec 25, 2014. 9p.
4. Pat. US 007856914B2 USA, Int. Cl.F41A 21/00. Noise suppressor / Jonathon Shults, Steven Michael Pappasa. – 12/324,623; Filed Nov. 26, 2008; Pub. Date: Dec 28, 2010. – 11p.
5. Schmidt, E.M., Gordner, R.E., Fansler, K.S. Flow Field during Projectile Exit from the Barrel.(1985). “Aehrosmicheskaya tekhnika”, materialy iz zhurnalov amerikanskogo institute aehronavtiki I astronavtiki tematicheskij-vypusk *Aehrodinamika letatelnykh apparatov I ikh ehlementov*, Volume 3, No. 4, April 1985, pp. 126-128.
6. Levinson, Y.I. Aerodynamics of High Speeds (Gas Dynamics) (1950) Edited by B.Ya. Shumyatsky, Moscow: State Publishing House of Defense Industry [in Russian].
7. Information Technologies in Modeling (2017) *Materialy II-oi vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh* (23-24 bereznia 2017 r., m. Mykolaiv). Mykolaiv: MNU imeni V.O. Sukhomlynskoho. 74-78 [in Ukrainian].