

УДК 623.4.068.4

Дмитро КОТЛЯР

yardnight@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1718-753X

Дмитро ВОЛІК

dmitry.volik@gmail.com

м. Миколаїв

МОДЕЛЮВАННЯ ЯВИЩА РЕДУКЦІЇ ПОРОХОВИХ ГАЗІВ У ДУЛЬНОМУ ЗРІЗІ

Пропонується математичну структуру для визначення редукції дульних характеристик потоку за часом, що надає можливість реалізації "безкульового" моделювання процесу витoku порохових газів з дульного отвору під час пострілу, з метою проведення експериментальних досліджень газодинамічної ефективності профілювання внутрішньої порожнини глушника шуму пострілу для стрілецької зброї.

Ключові слова: характеристики потоку, дульний зріз, редукція тиску, швидкоплинні явища.

Постановка проблеми. Більшість досліджень швидкоплинних явищ та процесів відбувається із застосуванням пакетів FEM аналізу, не є винятком і дослідження балістичних процесів пострілу. Балістичні процеси умовно поділяють на внутрішні та зовнішні. Перші відбуваються до вильоту кулі зі ствола та характеризуються перетворенням енергії горіння пороху в потенціальну енергію потоку з подальшим перетворенням її у кінетичну енергію кулі. Зовнішня балістика розглядає політ кулі та вплив на неї навколишніх факторів взаємодії від дульного зрізу і до потрапляння її у мішень включаючи процеси, якими характеризується її повне зупинення.

У балістиці, найбільш проблемними є дослідження явищ на дульному зрізі ствола зброї, де відбувається перехід від внутрішньої балістики до зовнішньої. Дослідження явищ та процесів, що їх характеризують, мають особливе значення у вирішенні прикладних задач розробки новітніх пристроїв безшумної стрільби. Моделювання швидкоплинних у часі процесів внутрішньої балістики є складною ресурсномісткою задачею, що характеризується високими значеннями температурних полів (2500–3000 K) та повного тиску, що може сягати 3200–4500 атм, для стрілецької зброї [2, 3]. Моделювання всіх явищ внутрішньої балістики при кожному корельованому дослідженні пострілу з типової зброї є неефективним використанням часового та машинного ресурсу, а тому потребує спрощення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існують графіки спаду тиску після вильоту кулі, але вони узагальнюючі для ряду стрілецької зброї, а тому відповідають лише критерію якості, тобто характеру процесу без кількісних величин. Для визначення тиску порохових газів на дульному зрізі у заданий момент часу поширено використовується формула Бравина (1), що визначає характер тенденції спаду та потребує подальшого уточнення коефіцієнтів для кожного окремо калібру з заданим патроном [1, 3]:

$$P_d^* = P_0^* e^{-bt}, \quad (1)$$

де P_0^* – дульний тиск у момент вильоту кулі зі ствола, атм; b – емпіричний коефіцієнт; t – момент часу, с.

У джерелах [4, 5] подається формула розрахунку емпіричного коефіцієнту b , як його прямо пропорційна залежність від площі дульного отвору і дульного тиску у момент вильоту кулі, та обернено пропорційна – від коефіцієнту інерції порохових газів і швидкості потоку газів за кулею у момент її вильоту зі ствола. Відповідний математичний запис залежності виглядає наступним чином:

$$b = \frac{SP_{d0}}{(\beta - 0,5)\omega v_d}, \quad (2)$$

де S – площа прохідного перерізу ствола, мм²; p_{d0} – дульний тиск у момент вильоту снаряда зі ствола, Па; $\beta \approx \frac{1300}{v_d}$ – коефіцієнт дії інерції порохових газів; v_d – швидкість порохових газів у дульному зрізі у момент вильоту снаряда зі ствола; ω_d – масова швидкість потоку.

У [4] пропонується ряд допущень, які спрощують використання наведеної вище формули, наприклад, що швидкість потоку v_d дорівнює швидкості кулі у момент вильоту її з дула. В свою чергу, в результаті проведення ряду газодинамічних досліджень було виявлено, що на протязі основного часу витоку порохових газів спад швидкості потоку у дульному зрізі сягає 15–20 % від швидкості кулі у дульному зрізі в залежності від її калібру.

Ряд проведених досліджень з моделювання пострілу та витоку порохових газів зі стволів калібрів .338, .300 та .223 з подальшим апроксимуванням їх графіків падіння характеристик у дульному зрізі виявив, що запропонована залежність (2) недостатньо точно корелює графікам дослідно отриманих характеристик (див. рис. 1). У часовому співвідношенні, графіки на рис.1 показують, що редукція потоку за формулою (2) проходить у 3-4 рази швидше ніж під час проведення дослідного розрахунку.

У зв'язку з цим, з метою проведення більш коректного моделювання процесу «без кульового» витікання потоку порохових газів з дульного отвору, що надає можливості реалізувати дослідження ефективності глушника, формула Бравіна потребує уточнень емпіричного коефіцієнта b та перегляду його математичної структури.

Метою роботи є розробка універсальної математичної структури для визначення емпіричного коефіцієнта для розрахунку редукції дульних характеристик потоку за часом.

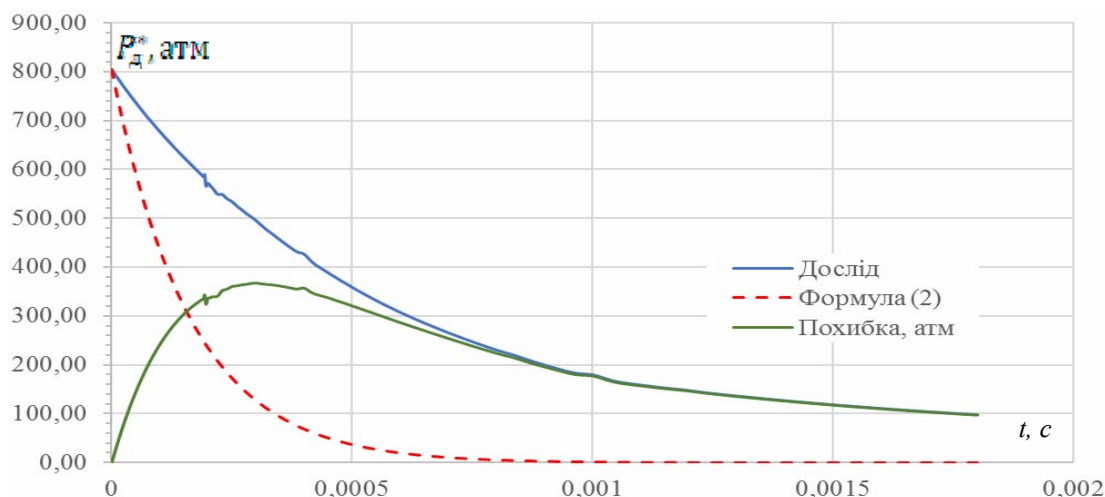


Рис. 1. Порівняння характеристик спаду повного тиску за часом у дульному зрізі

Основна частина. Газодинамічний розрахунок потоку реалізується з використанням часових залежностей редукції трьох дульних характеристик потоку: повного та статичного тисків, а також статичної температури. В свою чергу запропонована залежність (2) дозволяє дещо уточнити зміну повного тиску, але не має можливості встановити інші дві характеристики, тому є необхідність пошуку універсальної математичної структури опису означених вище часових залежностей зміни дульних характеристик.

Авторами пропонується залежність (3), що реалізувала достатню точність обумовлення процесу редукції параметрів потоку порохових газів.

$$b = \frac{\alpha \theta_0}{\beta + \gamma t}, \quad (3)$$

де θ_0 – дульний параметр потоку (P_0^* , P_0^{st} , T_0^{st}) у момент вильоту кулі зі ствола, атм, К; 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 (3) залежність було уніфіковано для визначення редукції параметрів повного і статичного тиску та параметру статичної температури у часі, що є необхідними для "безкульового" моделювання пострілу при дослідженнях зовнішньої балістики.

Дослідження потоку порохових газів проводилося із застосуванням пакетів FEM аналізу. Вирішувалася двовимірною задачею моделювання пострілу з карабіну Savage 110 BA з довжиною ствола 24"

та патроном. 338 Lapua Magnum. У ході розрахунку використовувалася динамічна сітка з 300 тис. розрахунковими елементами, де мінімальний розмір елемента склав 0.4 мм. Початкові умови: повний тиск 3900 атм, температура 2700 К, корельована маса кулі 10.5 гр. Число Куранта 1.5, та часовий шаг $5e-07$ с. Розрахунковий час процесу протяжністю у 2.2 мкс склав приблизно 4 доби машинного часу.

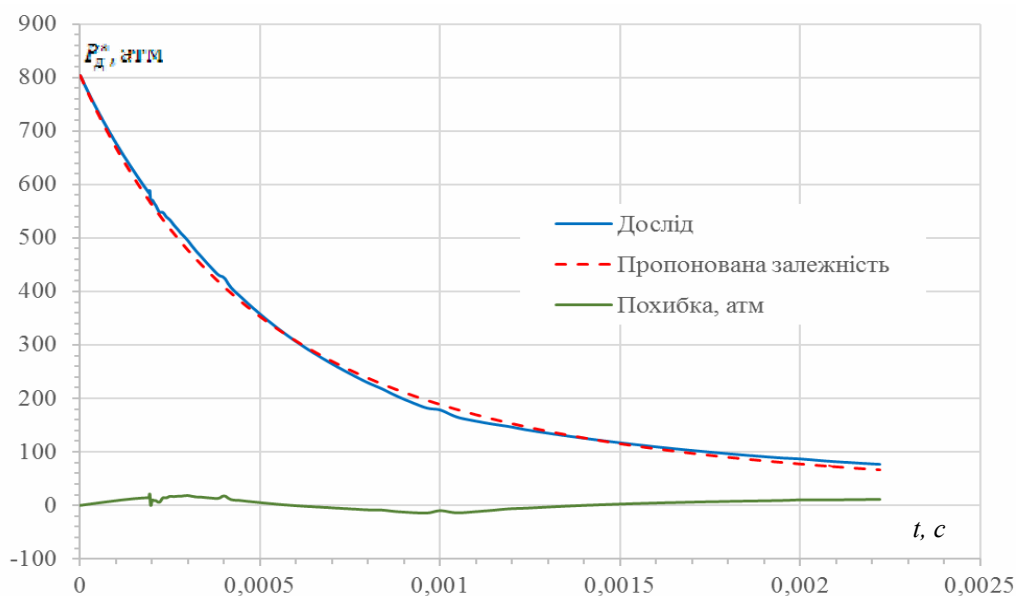


Рис. 2. Порівняння характеристик спаду повного тиску за часом у дульному зрізі

Провівши дослідження балістики для калібру .338 та проаналізувавши зняті графіки редукції цільових характеристик було отримано шукані коефіцієнти (3) 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: $\alpha = 0,5$; $\beta = 2,4$; $\gamma = 500$;

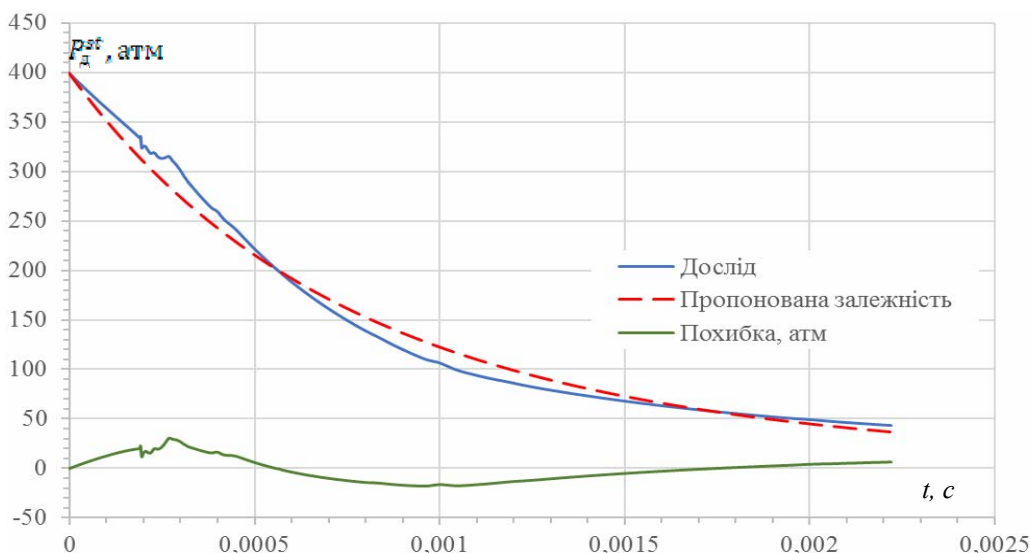


Рис. 3. Порівняння характеристик спаду статичного тиску за часом у дульному зрізі

На рис. 2–4 зображено порівняння редукції дульних характеристик повного і статичного тисків та статичної температури, значення яких були визначені за запропонованою залежністю (3), зі знятими значеннями з дослідного розрахунку.

Абсолютна похибка при визначенні редукції повного тиску для калібру. 338 патрон Lapua Magnum коливається у діапазоні 20 атм на досліджуваному інтервалі 0,0022 с (див. рис. 2), де за точку відліку

часу прийнято момент проходження дна кулі через дульний зріз. Середня похибка склала 2,5 атм, що у відносному значенні $\epsilon_{\text{сеп}}$ становить 0,5 %.

На рис. 3 відображено максимальну абсолютну похибку визначення статичного тиску, яка сягає 36 атм, що пов'язано з коливаннями характеристик потоку у дульному зрізі від впливу на нього кулі. Вплив кулі провокує появу ділянки графіку з лінійною залежністю редуції потоку та потребує складної структури опису характеристики. Тому з метою спрощення залежності вплив кулі пропонується нівелювати, оскільки наявність кулі спотворює процес, а самі пульсації мають незначний характер. Середнє значення похибки для визначення статичного тиску на дульному зрізі у заданий момент часу складає $-0,6$ атм, що у відносному значенні $\epsilon_{\text{сеп}}$ становить $-0,3$ %.

Подібний вплив кулі на зміну характеристик потоку спостерігається і на графіку редуції статичної температури (див. рис. 4). Середнє значення похибки для визначення статичної температури складає $7,9$ атм, що у відносному значенні $\epsilon_{\text{сеп}}$ становить $0,72$ %.

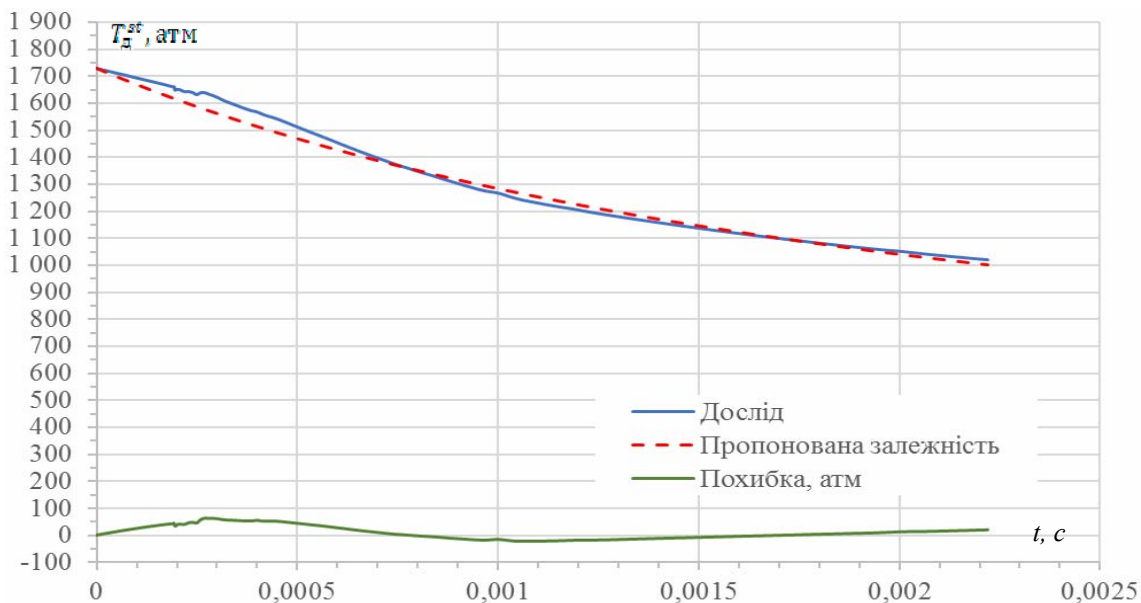


Рис. 4. Порівняння характеристик спаду статичної температури за часом у дульному зрізі

Проведений порівняльний аналіз побудованих графіків дозволяє стверджувати про достатньо високу адекватність отриманих розрахунковим способом характеристик потоку на дульному зрізі з використанням запропонованої авторами залежності (3). Запропоновану математичну структуру можливо використовувати при встановленні подібних характеристик потоку і для інших калібрів. Так наприклад, для калібру 300 з патроном 7,62x39 були встановлені наступні коефіцієнти зі зазначенням середньої відносної похибки:

- для повного тиску: $\alpha = 0,9$, $\beta = 0,21$, $\gamma = 53$, $\epsilon_{\text{сеп}} = 0,6$ %;
- для статичного тиску: $\alpha = 0,9$, $\beta = 0,084$, $\gamma = 30$, $\epsilon_{\text{сеп}} = 2,1$ %;
- для статичної температури: $\alpha = 0,9$, $\beta = 1,0$, $\gamma = 300$, $\epsilon_{\text{сеп}} = 0,5$ %.

Висновки та перспективи. В результаті проведених досліджень було винайдено математичну структуру, що уточнює значення емпіричного коефіцієнту b для формули Бравіна. Структуру було уніфіковано з метою застосування формули Бравіна для визначення інших часових залежностей редуції цільових характеристик потоку, що надало можливість реалізувати "безкульове" моделювання процесів витікання порохових газів з дульного отвору під час пострілу. Надалі планується уточнити значення коефіцієнтів α, β, γ для інших калібрів.

Список використаних джерел

1. Левинсон Я. И. Аэродинамика больших скоростей (газовая динамика) / под ред. Б. Я. Шумяцкого. — М. : Государственное издательство оборонной промышленности, 1950. — 352 с.
2. Оружие пехоты: Энциклопедия стрелкового оружия / Пер. с англ. Шант К. — М. : Омега, 2007. — 256 с.
3. Проектирование ракетных и ствольных систем / Под ред. Б. В. Орлова. — М. : Машиностроение, 1974. — 828 с.
4. Ручное огнестрельное оружие бесшумного боя / Н. А. Коновалов. — Днепропетровск : НАН Украины и НКА Украины, Институт технической механики, 2008. — 303 с.

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. Т. 3, № 4, апрель. — 1985. — С. 126—128.

Dmitry KOTLYAR, Dmitry VOLIK

Mykolaiv

MODELING OF THE POWDER GAS REDUCTION PROCESS IN THE GUN MUZZLE

In the article is represented mathematic model for definition of gas flow parameters reduction near gun's muzzle which gives possibility to calculate gunpowder gases flow out of barrel without bullet motion modeling. That is done in order to perform experimental research of efficiency of profiling inner shape of sound suppressor for gun.

Key words: flow characteristics, muzzle cut, pressure reduction, short-term process.

Дмитрий КОТЛЯР, Дмитрий ВОЛИК

г. Николаев

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ РЕДУКЦИИ ПОРОХОВЫХ ГАЗОВ В ДУЛЬНОМ СРЕЗЕ

Предлагается математическая структура для определения редукции дульных характеристик потока по времени, что предоставляет возможность реализации "беспулевого" моделирования процесса истечения пороховых газов из дульного отверстия во время выстрела, с целью проведения экспериментальных исследований газодинамической эффективности профилирования внутренней полости глушителя шума выстрела стрелкового оружия.

Ключевые слова: характеристики потока, дульный срез, редукция давления, быстротечные явления.

Стаття надійшла до редколегії 01.04.2017