

УДК 623.451.7 + 623.465

DOI: [https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2\(50\).27-31](https://doi.org/1034169/2414-0651.2026.2(50).27-31)

О. А. МАЙСТРЕНКО, кандидат технічних наук
старший дослідник
<https://orcid.org/0000-0001-9701-7359>

Е. С. ОСТАПЧУК
<https://orcid.org/0009-0002-8095-0203>
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)

Б. І. АДАМЕНКО
<https://orcid.org/0000-0003-3814-3624>

О. В. ТИМОШКО
(АТ «Компанія авіаційного та ракетно-технічного машинобудування»)

ТЕХНОЛОГІЇ ПІДВИЩЕННЯ ДАЛЬНОСТІ СТРІЛЬБИ АРТИЛЕРІЙСЬКИХ БОЄПРИПАСІВ: ДОННИЙ ГАЗОГЕНЕРАТОР, АКТИВНО-РЕАКТИВНИЙ СНАРЯД ТА ПРЯМОТОЧНИЙ ПОВІТРЯНО-РЕАКТИВНИЙ ДВИГУН – ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ

У статті проведено комплексний порівняльний аналіз трьох технологій підвищення дальності стрільби 155-мм артилерійських боєприпасів: донного газогенератора (Base Bleed, BB), активно-реактивного снаряда (APC) з твердим ракетним двигуном та прямомоточного повітряно-реактивного двигуна (ПВРД, Ramjet). Розглянуто фізичні механізми зниження аеродинамічного опору, хімічний склад твердого палива, конструктивні особливості та аеробалістичні властивості кожної технології. На основі формалізованої моделі ефективної вартості ураження цілі СРК (Cost Per Kill) виконано кількісне порівняння семи сучасних зразків 155-мм боєприпасів за критерієм вартість/дальність/точність. Встановлено, що гібридні системи BB+SRM забезпечують дальність 60–76 км і є оптимальними за критерієм вартість/ефект для поточного покоління ствольної артилерії. Снаряди з Ramjet-двигуном є єдиною технологією, здатною досягти 100–150 км без критичної ерозії ствола, але потребують вирішення фундаментальних науково-технічних проблем. Запропоновано семирівневу ієрархію дослідницьких задач для реалізації гібридних далекобійних систем.

Ключові слова: донний газогенератор, активно-реактивний снаряд, прямомоточний повітряно-реактивний двигун, дальність стрільби, аеродинамічний опір, модель СРК, 155-мм артилерія, тверде ракетне паливо.

ВСТУП

Повномасштабне збройне протистояння в Україні підтвердило: артилерія залишається вирішальним засобом вогневого ураження, а перевага у дальності безпосередньо визначає результат контрбатарейної боротьби та глибину вогневого впливу на оперативних тилах противника. Стандартні 155-мм снаряди типу M795 мають максимальну дальність 22–24 км (гармати L/39) та 30 км (L/52), що в умовах сучасного театру воєнних дій виявляється недостатнім для ефективного вогневого контролю.

Три технологічні підходи спрямовані на подолання цього обмеження. Донний газогенератор (Base Bleed, BB) – зріла серійна технологія, що забезпечує 30–43 км. Активно-реактивний снаряд (APC) з твердим ракетним двигуном (SRM) – технологія активного розвитку, яка дає 30–76 км залежно від конфігурації. Прямоточний повітряно-реактивний двигун (Ramjet) – перспективна технологія наступного покоління з потенціалом 100–150 км, що перебуває на стадії льотних випробувань.

Мета статті – провести комплексний порівняльний аналіз зазначених технологій за уніфікованими кількісними критеріями ефективності та сформулювати актуальні напрями наукових досліджень для вітчизняної оборонно-промислової бази. Аналіз виконано на основі формалізованої балістично-економічної моделі СРК, а також огляду публікацій у провідних міжнародних виданнях – Aerospace Science and Technology, Defense Technology та Propellants, Explosives, Pyrotechnics (Wiley).

Проблема дефіциту дальності не є новою: ще у 1979–1988 рр. радянські дослідники Миронов, Белецький, Федосов та ін. публікували результати досліджень НДС (напружено-деформованого стану) зарядів APC при комплексному навантаженні, динаміки зниження ударних перевантажень та моделей аномального запалювання ракетного заряду [1–3]. Ці роботи є прямими попередниками сучасних досліджень і демонструють, що фундаментальні фізичні проблеми твердопаливних систем – нестаціонарне горіння при депресуризації, механічна цілісність при пострілі – залишаються актуальними й через 45 років.

ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЗНИЖЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНОГО ОПОРУ

Загальний аеродинамічний опір 155-мм снаряда в надзвуковому режимі польоту складається з трьох компонентів: хвильового опору носової частини (50–60 %), опору тертя поверхні (10–15 %) та донного опору (30–40 %). Особливість донного опору полягає в тому, що на числах M його частка зростає до 50–75 % від загального опору, оскільки саме в транзвуковому режимі зона рециркуляції за дном снаряда має найбільші розміри та найнижчий тиск [4].

Донний опір виникає внаслідок відриву потоку на задній кромці та формування зони рециркуляції. Для

аеродинамічно оптимізованих снарядів типу ERFB донний опір відповідає за 75 % загального опору на числах M близько 0,9 та за 50–55 % при $M > 1,2$ [5]. Ця закономірність є фізичним обґрунтуванням ефективності ВВ саме в надзвуковому режимі.

Три технології адресують цю проблему через принципово різні механізми: ВВ усуває зону рециркуляції шляхом масового впорскування газу (підвищення донного тиску до рівня атмосферного); APC/SRM компенсує ретардаційну силу активною реактивною тягою; Ramjet підтримує надзвукову швидкість протягом усього польоту, мінімізуючи час перебування в трансзвуковому режимі з максимальним донним опором. Ці механізми взаємодоповнюються в гібридних конструкціях ВВ з SRM (V-LAP).

ТЕХНОЛОГІЯ ДОННОГО ГАЗОГЕНЕРАТОРА (BASE BLEED)

Технологія ВВ бере початок від досліджень Інституту оборонних досліджень Швеції (FOA) у 1969–1971 рр. та патентів на снаряд ERFB канадського інженера Джеральда Булла. Принцип дії ґрунтується на спалюванні малого заряду твердого палива у задонній камері снаряда і подаванні продуктів згоряння через калібровані сопла у зону рециркуляції. На відміну від ракетного двигуна, ВВ-генератор не створює тяги – він лише вирівнює різницю тисків між дном снаряда та атмосферою.

Ефективність ВВ визначається безрозмірним параметром впорскування

$$I = \dot{m}_j / (\rho_{inf} v_{inf} A),$$

де \dot{m}_j – масова витрата газу генератора, ρ_{inf} і v_{inf} – щільність та швидкість набігаючого потоку, A – площа дна снаряда. Дослідження, опубліковані в Aerospace Science and Technology та Defense Technology, встановили оптимальне значення $I \approx 0,005$: при ньому зниження донного опору досягає 50–75 % у надзвуковому режимі ($M = 1,5–3,0$), що забезпечує приріст дальності 25–35 %. Перевищення оптимального I є контрпродуктивним: надлишковий струмінь руйнує структуру зони рециркуляції і збільшує загальний опір [4].

Сучасне паливо ВВ-генераторів є сумішевим на основі перхлорату амонію AP (75 %), полібутадієну НТРВ (15–20 %), алюмінієвого порошку (5 %) та оксиду заліза Fe_2O_3 як каталізатора горіння (1–2 %). Критичною проблемою залишається повторне запалювання (reignition) при виході снаряда зі ствола. Дослідження Нанкінського університету науки і технологій (NUST) показали, що піротехнічні суміші Mg/PTFE з оптимізованою гранулометриєю забезпечують повторне запалювання за 94–280 мс; варіативність цього параметра є головним джерелом дисперсії CEP і потребує вирішення для інтеграції ВВ з модулями точного наведення [5].

Провідні серійні зразки ВВ-боєприпасів: K307 HE-BB (Poongsan, Корея) – 41 км з L/52, вартість ~4 500 USD; LU 211 BB (KNDS, Франція) – 40 км; OFd M3-DV (MSM Group, Польща/Словаччина) – 43 км з L/52; DM131 з модулем PGK (Rheinmetall, Німеччина) – 40 км, CEP < 20 м.

АКТИВНО-РЕАКТИВНИЙ СНАРЯД З ТВЕРДИМ РАКЕТНИМ ДВИГУНОМ

APC поєднує артилерійський снаряд та SRM, що вмикається через піротехнічний сповільнювач через 5–10 секунд після пострілу. Затримка необхідна для стабілізації снаряда в зоні максимальної турбулентності поблизу дульного зрізу. На відміну від ВВ, APC створює активну реактивну тягу, прямо компенсуючи аеродинамічний опір і збільшуючи дальність на 25–60 % залежно від маси палива [6].

Класичним представником є американський M549A1 HE-RAP: маса палива SRM – 3,2 кг, час роботи – ~3 секунди, дальність – 30,1 км з L/39. Ключовим конструктивним компромісом є зменшення маси ВР: у M549A1 – 6,8 кг проти 10,5 кг у M795, тобто зниження летальності на 35 %. Цей компроміс є фізичним, а не технологічним: об'єм калібру є константою.

Снаряд XM1113 (General Dynamics OTS, США) є принципово новим рівнем. Двигун забезпечує тягу, утричі більшу за M549A1, а вдосконалений аеродинамічний профіль дає 40 км з L/39 та 70 км зі стволів L/58. Споряджений нечутливою ВР IMX-104 (DNAN+NTO+RDX, швидкість детонації 7,4 км/с), яка відповідає стандартам IM НАТО. Вартість: 13 656 USD (L/39) та 14 484 USD (Extended Range для L/58) [7, 8].

Гібридна конструкція V-LAP (Rheinmetall Denel, ПАР) є найбільш ефективним поточно доступним рішенням: ВВ-генератор вмикається першим (фаза M 1,5–3,0), після його вигорання залишковий заряд функціонує як ВВ на спадній ділянці, а SRM забезпечує активний розгін на висхідній. Рекорди полігонних випробувань (Алкантпан, 2019): 54 км з L/39, 67 км з L/52 (PzH 2000), 76 км з L/52 зі збільшеною каморою. Вартість: 6 000–9 000 USD [9].

ПРЯМОТОЧНИЙ ПОВІТРЯНО-РЕАКТИВНИЙ ДВИГУН (RAMJET 155)

ПВРД принципово відрізняється від SRM відсутністю окислювача на борту: атмосферний кисень стискається за рахунок надзвукового руху снаряда (ефект рамстиснення, $M > 1,5$), змішується з паливом у камері згоряння і згорає, генеруючи постійну тягу протягом 40–60 секунд. Це дозволяє підтримувати швидкість снаряда близько до надзвукової протягом усього польоту та досягати дальностей 100–150 км [10].

Спільний проєкт Boeing та Nammo (Норвегія) – Ramjet 155 – є найбільш просунутою публічно відомою розробкою. Льотні випробування 2022 р. підтвердили: стабільність горіння ПВРД після перевантажень при пострілі (15 000–20 000 g) та збереження надзвукового польоту після запуску двигуна. Потенційна дальність – до 150 км. ПТ Madras (Індія, 2025) підтвердив принципову сумісність Ramjet-снаряда зі стандартною гарматою без руйнування вузлів [11].

Технологія ПВРД стикається з трьома класами фундаментальних проблем, що потребують окремих дослідницьких програм. Клас I – стабільність горіння: паливо з високим вмістом бору В, оптимальне за питомим імпульсом, утворює в'язкий оксид B_2O_3 , що осідає в камері згоряння і може блокувати повітрязабірник; ця проблема не має опублікованого рішення. Клас II –

геометричні обмеження: розміщення камери згоряння, повітрязабірника та паливного зерна у калібрі 155 мм при збереженні прийнятної маси БЧ є конструктивно надскладним завданням; відкриті дані про масу БЧ відсутні. Клас III – аеробалістична стабільність: снаряд із бічними або фронтальними повітрязабірниками має принципово інший профіль аеродинамічних моментів, що потребує нової теорії гіроскопічної стабілізації для тіл із несиметричним розподілом тиску.

КІЛЬКІСНИЙ ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ: МОДЕЛЬ СРК

Для об'єктивного порівняння зразків у роботі застосовано формалізовану модель ефективної вартості ураження цілі СРК. Модель ґрунтується на двовимірному нормальному законі розподілу точок падіння снаряда. Імовірність влучання в коло радіуса R_t при круговому ймовірному відхиленні СЕР визначається як:

$$P_{hit}(R_t, CEP) = 1 - \exp(-R_t^2 \cdot \ln 2 / CEP^2).$$

Ефективна вартість ураження однієї цілі з імовірністю $P_k = 0,90$ (стандарт «знищення» НАТО):

$$СРК = N_{req} \cdot C_{round} + C_{fixed},$$

$$де N_{req} = \left[\ln(1 - P_k) / \ln(1 - p_{eff}) \right],$$

де $p_{eff} = P_{hit} \cdot P_{fuse} \cdot P_{lethal}$ – ефективна імовірність знищення одним пострілом; $C_{fixed} = 10000$ USD – фіксовані витрати місії (цілевказівка, позиціонування). Параметри P_{fuse} та P_{lethal} прийнято: для некерованих – 0,97 та 0,15 (по бронетехніці); для керованих – 0,97-0,98 та 0,40-0,45. Розрахунок виконано для чотирьох класів типових цілей при дальності $D = 25$ км.

Зведені характеристики та результати розрахунку СРК наведено у табл. 1 і 2.

Аналіз таблиць 1–2 дозволяє сформулювати три операційних висновки. По-перше, некеровані снаряди (M795, K307, M549A1) є фізично неефективними проти точкових захищених цілей ($R_t = 3$ м): необхідна кількість пострілів перевищує 14 000–20 000 одиниць, що є абсолютно нереалістичним в оперативному контексті. По-друге, M795+PGK є домінуючим рішенням за критерієм СРК для цілей $R_t = 5$ –40 м: СРК \$72–112 К проти \$252–412 К для Excalibur при еквівалентному ефекті – різниця вартості (\$20 000 vs \$80 000 за снаряд) є фундаментальнішою, ніж різниця точності (СЕР 6 м – 7 м). По-третє, Vulcano GLR виправданий лише у вузькому класі завдань, де одночасно потрібні дальність понад 50 км і точність менше 5 м.

СЕМИРІВНЕВА ІЄРАРХІЯ НАУКОВИХ ЗАДАЧ

На основі проведеного аналізу пропонується ієрархія взаємопов'язаних дослідницьких задач, побудована від фундаментальних явищ до системної інтеграції. Логіка ієрархії полягає в тому, що результати кожного рівня є необхідними вхідними даними для наступного.

Рівень 1 – хімічна кінетика горіння при депресуризації. Задача: встановити кількісну залежність часу повторного запалювання t_d від складу суміші AP/HTPB та морфології піротехнічного ігнітора Mg/PTFE. Метод: DSC/TG-аналіз у поєднанні з ударно-трубними випробуваннями.

Рівень 2 – нестационарна CFD-аеродинаміка. Задача: моделювання взаємодії ВВ-струменя із зоною рециркуляції для обертового снаряда засобами RANS SST $k-\omega$ з Chimera-сіткою. Гіпотеза: обертання зміщує оптимальний параметр I від канонічного 0,005.

Рівень 3 – мультифізична модель міцності гібридних корпусів. Задача: зв'язана задача пружно-пластичної

Т а б л и ц я 1. Тактико-технічні характеристики сучасних 155-мм боєприпасів

Зразок	Тип	СЕР (м)	L/39 (км)	L/52 (км)	Вартість (USD)	СРК R=10м (USD)	ВР (кг)	ІМ
M795 HE	HE	~200	22–24	30	3 600	>5 000 000	10,5	Ні
K307 HE-BB	BB	~180	30	41	4 500	>4 500 000	9,8	Ні
M549A1 RAP	ARS	~267	30,1	-	3 200	>7 000 000	6,8	Ні
M795+PGK	HE+PGK	6	22–24	30	20 000	112 000	10,5	Ні
XM1113+LR-PGK	ARS+PGK	10	40	70	25 000	137 000	~6,0	Так
M982 Excalibur	GPS	7	40	50	80 000	412 000	22,0	Ні
Vulcano 155 GLR	GPS/SAL	5	50	70	~100 000	512 000	~15,0	-

Примітки: ІМ – нечутливий боєприпас (Insensitive Munitions); СРК розраховано для $P_k = 0,90$, ціль $R_t = 10$ м (вантажівка/відкрита гармата), $D = 25$ км, $C_{fixed} = 10000$ USD.

Т а б л и ц я 2. Ефективна вартість СРК (тис. USD) по чотирьох класах цілей ($P_k=0,90$)

Зразок	Танк/КП R = 3 м	Вантажівка R = 10 м	Взвод R = 40м	Батарей R = 150 м
M795 HE	>36 000	5 617	332	33
K307 HE-BB	>45 000	5 660	337	35
M549A1 RAP	>32 000	8 864	515	35
M795+PGK	292	112	72	72
XM1113+LR-PGK	1 012	137	87	87
M982 Excalibur	1 452	412	252	252
Vulcano 155 GLR	912	512	312	312

механіки та термодинаміки для конструкцій BB+SRM при 15 000–20 000 g. Метод: Abaqus + AUTODYN.

Рівень 4 – розширена 6-DOF модель зовнішньої балістики. Задача: введення нестационарної тяги BB/SRM/Ramjet у стандарт STANAG 4355 і розрахунок оновлених балістичних таблиць для гібридних систем. Результат – програмний модуль для бортових обчислювачів FDDCU.

Рівень 5 – оптимізація геометрії BB-генератора. Задача: замкнена задача оптимізації параметрів (R_{max} , L_i , d_e , профіль сопла) за критерієм максимізації середньої дальності методами суррогатного моделювання (Kriging/RBFNN). Очікуваний додатковий приріст від деформівних сопел – до 1,7 %.

Рівень 6 – теорія гібридної послідовної системи BB+SRM. Задача: формалізація аналітичної моделі «ефективного вікна» для кожного компонента як функції числа Маха та висоти польоту; встановлення умов переходу BB→SRM для максимізації інтегрального приросту дальності.

Рівень 7 – Ramjet 155 мм: від концепту до серійного виробництва. Задача: три паралельних треки – (а) нові паливні склади без утворення V_2O_3 при вмісті $V > 25$ %; (б) компактний повітрязабірник в калібрі 155 мм з мінімальними аеродинамічними втратами; (в) нова теорія гіроскопічної стабілізації тіл із несиметричним розподілом тиску. Горизонт: 2027–2030.

ВИСНОВКИ

1. Технологія Base Bleed є зрілою серійною технологією з технологічною стелею дальності 43–45 км для стволів L/52. Ключовим невирішеним питанням є варіативність часу повторного запалювання, що обмежує інтеграцію BB з модулями точного наведення.

2. APC з SRM дозволяє досягати 30–70 км залежно від конфігурації, але має фундаментальний компроміс між дальністю та масою ВР. Гібридна конструкція BB+SRM (V-LAP) є найбільш ефективним доступним рішенням: 67–76 км при вартості 6 000–9 000 USD.

3. Ramjet є єдиною технологією, здатною подолати бар'єр 70 км без критичної ерозії ствола. Льотні випробування 2022–2025 рр. підтверджують принципову реалізованість, але три класи фундаментальних проблем потребують систематичних досліджень з горизонтом 2027–2030 рр.

4. СРК-модель встановила контрінтуїтивний результат: M795+PGK є домінуючим рішенням за критерієм вартість/ефект для цілей $R_t = 5–40$ м – дешевший за Excalibur у 4 рази при практично еквівалентному результаті. Оптимальна стратегія – обґрунтоване змішування типів боєприпасів залежно від класу цілі.

5. Для вітчизняної оборонної науки найбільш доцільним є зосередження на рівнях 3–5 запропонованої ієрархії: мультифізичне моделювання корпусів, балістичні таблиці гібридних систем та оптимізація BB-генераторів. Ці напрями поєднують безпосередній прикладний вихід з наявною вітчизняною компетенцією.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Миронов В. И., Белецкий Л. К. Напряженное состояние и прочность твердотопливного заряда APC при комплексном нагружении. *Боєприпасы*. 1979. № 7. С. 18–21.
2. Расчетная оценка снижения ударных нагрузок, действующих на заряд РДТТ APC / Федосов А. А., Лудченко В. Г., Михалин А. А., Шейнин Б. Л. *Боєприпасы*. 1988. № 10. С. 16–18.
3. Математическая модель аномального воспламенения ракетного заряда в двигателе APC / Амосов А. П., Гордиенко Н. П., Колпаков В. А., Михалин А. А. *Боєприпасы*. 1987. № 5. С. 3–5.
4. Investigation of the Aerodynamic Benefits of Base Bleed Technology on Artillery Shells. *Proc. of SBMAC*. 2022.
5. Effects of Mg/PTFE pyrotechnic compositions on reignition characteristics of base bleed propellants and heating mechanism. *ResearchGate*. 2020. DOI: 10.1016/j.dt.2020.09.004.
6. M549 – Rocket-assisted projectile. *Wikipedia*. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/M549>.
7. Army developing safer, extended range rocket-assisted artillery round. *U.S. Army official website*. 2016.
8. 155mm XM1113 Extended Range, Rocket Assisted Projectile. *General Dynamics Ordnance and Tactical Systems*. 2022.
9. Assegai V-LAP. *Deagel.com*. URL: <https://deagel.com/Weapons/Assegai-V-LAP/a000925>.
10. The range revolution. *Nammo official website*. 2023. URL: <https://www.nammo.com/story/the-range-revolution/>.
11. IIT Madras develops ramjet-assisted Artillery Shells to extend gun range without compromising lethality. *IIT Madras*. 2025.
12. *Aerospace Science and Technology*. Elsevier. Q1 Scopus.
13. *Defense Technology*. KeAi Publishing. Q1 Scopus.
14. A comparative analysis of contemporary 155 mm artillery projectiles. *J. of Defense Analytics and Logistics*. 2019. Vol. 3. № 2. Pp. 171–192.
15. M982 Excalibur. *Wikipedia*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/M982_Excalibur.
16. Live Firing and 3D Numerical Investigation of Base Bleed Exit Configuration Impact on Projectile Drag. *Advances in Military Technology*. 2022. Vol. 17. № 2. Pp. 319–334.

REFERENCES

1. Mironov, V.I. & Beletsky, L.K. (1979). “Napriagennoe sostoianie i prochnost tvedotoplevnogo zariada ARS pri kompleksnom napriagenii” [Stressed state and strength of a solid fuel charge of ARS under complex loading]. *Ammunition*. No. 7. Pp. 18–21.
2. Fedosov, A.A., Ludchenko, V.G., Mikhalyn, A.A. & Sheynin, B.L. (1988). “Raschetnaia otsinka snigeniia udarnykh nagruzok, deistvuiuchikh na zarad RDTT ARS” [Calculation assessment of the reduction of shock loads acting on the charge of ARD TT ARS]. *Ammunition*. No. 10. Pp. 16–18.
3. Amosov, A.P., Gordienko, N.P., Kolpakov, V.A. & Mikhalyn, A.A. “Matematichna model anomalnogo vosplameneniia raketnogo zariada v dvigune ARS” [Mathematical model of anomalous ignition of a rocket charge in an ARS engine]. *Ammunition*. 1987. No. 5. Pp. 3–5.

4. Investigation of the Aerodynamic Benefits of Base Bleed Technology on Artillery Shells. Proc. of SBMAC. 2022.
5. Effects of Mg/PTFE pyrotechnic compositions on reignition characteristics of base bleed propellants and heating mechanism. ResearchGate. 2020. DOI: 10.1016/j.dt.2020.09.004.
6. M549 – Rocket-assisted projectile. Wikipedia. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/M549>.
7. Army developing safer, extended range rocket-assisted artillery round. U.S. Army official website. 2016.
8. 155mm XM1113 Extended Range, Rocket Assisted Projectile. General Dynamics Ordnance and Tactical Systems. 2022.
9. Assegai V-LAP. Deagel.com. URL: <https://deagel.com/Weapons/Assegai-V-LAP/a000925>.
10. The range revolution. Nammo official website. 2023. URL: <https://www.nammo.com/story/the-range-revolution/>.
11. IIT Madras develops ramjet-assisted Artillery Shells to extend gun range without compromising lethality. IIT Madras. 2025.
12. Aerospace Science and Technology. Elsevier. Q1 Scopus.
13. Defense Technology. KeAi Publishing. Q1 Scopus.
14. A comparative analysis of contemporary 155 mm artillery projectiles. J. of Defense Analytics and Logistics. 2019. Vol. 3. № 2. Pp. 171—192.
15. M982 Excalibur. Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/M982_Excalibur.
16. Live Firing and 3D Numerical Investigation of Base Bleed Exit Configuration Impact on Projectile Drag. Advances in Military Technology. 2022. Vol. 17. № 2. Pp. 319—334.

**Maystrenko O.A., Ostapchuk E.S.,
Adamenko B.I., Timochko O.V.**

**TECHNOLOGIES FOR INCREASING THE FIRING
RANGE OF ARTILLERY AMMUNITION: BOTTOM
GAS GENERATOR, ACTIVE-JET PROJECTILE
AND DIRECT-FLOW AIR-JET ENGINE –
COMPARATIVE ANALYSIS**

This paper presents a comprehensive comparative analysis of three technologies for increasing the range of 155-mm artillery projectiles: Base Bleed (BB), Rocket-Assisted Projectile (RAP) with solid rocket motor, and Ramjet propulsion. The physical mechanisms of aerodynamic drag reduction, solid propellant composition, design features, and aeroballistic properties are examined. Using a formalized Cost Per Kill (CPK) effectiveness model, a quantitative comparison of seven modern 155-mm munition systems by cost/range/accuracy criteria is performed. It is established that hybrid BB+SRM systems achieve 60–76 km range and are optimal by cost/effectiveness criteria for current gun artillery. Ramjet projectiles represent the only technology capable of reaching 100–150 km without critical barrel erosion but require resolution of fundamental scientific and technical problems. A seven-level research task hierarchy for implementing hybrid long-range systems is proposed.

Keywords: base bleed, rocket-assisted projectile, ramjet, firing range, aerodynamic drag, CPK model, 155-mm artillery, solid rocket propellant.

Відомості про авторів:

Майстренко Олександр Анатолійович

кандидат технічних наук
провідний науковий співробітник
Центральний науково-дослідний інститут озброєння
та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-9701-7359>
e-mail: alexia_g@ukr.net

Остапчук Едуард Станіславович

начальник відділу
Центральний науково-дослідний інститут озброєння
та військової техніки Збройних Сил України
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0009-0002-8095-0203>

Адаменко Богдан Іванович

заступник директора
АТ «Компанія авіаційного та ракетно-технічного
машинобудування»
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-3814-3624>

Тимошко Олександр Вячеславович

головний конструктор
АТ «Компанія авіаційного та ракетно-технічного
машинобудування»
м. Київ, Україна

Information about the authors:

Maystrenko Olexandr

Candidate of Technical Sciences
Leading Research Fellow
Central Scientific Research Institute of Armament and
Military Equipment of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-9701-7359>
e-mail: alexia_g@ukr.net

Ostapchuk Eduard

Head of Department
Central Scientific Research Institute of Armament and
Military Equipment
of Armed Forces of Ukraine
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0002-8095-0203>

Adamenko Bohdan

Deputy Director of JSC
«Aviation and Rocket Engineering Company»
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-3814-3624>

Tymoshko Olexandr

Chief Designer of JSC
«Aviation and Rocket Engineering Company»
Kyiv, Ukraine

Стаття надійшла до редколегії 02.04.2026.

Стаття прийнята до друку після рецензування 21.05.2026.

Стаття опублікована 30.06.2026.