

**Ю.І. Войтенко, д.т.н.**  
Інститут гідромеханіки НАН України  
**С.В. Гошовський, д.т.н., проф.**  
Науковий гідрофізичний центр НАН України  
**Ю.М. Сидоренко, д.т.н., проф.**  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
**А.М. Пасічник, к.т.н.**  
Інститут гідромеханіки НАН України

## Про оптимальні конструкції кумулятивних зарядів глибокого пробиття

**Мета.** Узагальнення результатів авторських досліджень впливу форми лайнера на масово-кінетичні характеристики струменів, визначення шляхів остаточної оптимізації конструкції заряду, аналіз сумісного впливу форми і матеріалів для виготовлення облицювань кумулятивної виїмки на ефективність зарядів.

**Методика.** Методологічною основою дослідження є системний підхід до проблеми підвищення ефективності кумулятивного вибуху. Відповідно до специфіки досліджень, спрямованих на досягнення поставлених цілей та отримання технологічних залежностей, у роботі використано фізичне і математичне моделювання.

**Результати.** Висвітлено результати порівняння параметрів функціонування кумулятивних зарядів з трьома формами лайнерів: конічним з кутом при вершині  $2\alpha = 42^\circ$  постійної товщини, прогресивної товщини з кутом при вершині  $42^\circ/43^\circ$ , біконічними з кутами при вершині і основі  $38^\circ/50^\circ$  та  $35^\circ/50^\circ$  і напівеліптичним. В окремих випадках моделювалися різні схеми збудження детонації: із точки на осі симетрії і по колу діаметром, що дорівнює калібру заряду. Проведено порівняння результатів моделювання з даними експериментальних досліджень для короткого напівеліптичного лайнера, отриманими на макетах зарядів. Проведено порівняння результатів глибини проникнення кумулятивних струменів у перепону за моделлю A-V (Allison і Vitali) для стандартного заряду ( $2\alpha = 42^\circ$ ), біконічних і напівеліптичних лайнерів.

**Наукова новизна.** Перспективними формами облицювань кумулятивних зарядів глибокого пробиття є двоконічний і еліптичний лайнери, які дозволяють сформувати кумулятивні струмені, які рухаються зі швидкостями більшими, ніж швидкість струменя при підриванні стандартного кумулятивного заряду з конічним лайнером. Зі зменшенням кута при вершині конічного лайнера збільшується нестабільність функціонування промислових зарядів і розкид глибини пробиття мішені.

**Практична значущість.** Отримані результати є важливими та корисними для проєктування техніки і технологій у різноманітних галузях, де використовується енергія спрямованого вибуху: для знешкодження і утилізації боєприпасів, для розкриття нафтових і газових пластів, для реконструкції будівельних споруд, у військовій справі.

**Ключові слова:** кумулятивний заряд; детонація; облицювання; кумулятивний струмінь; глибина пробиття.

Для проникнення у міцні перепони використовуються кінетичні ударники і кумулятивні заряди. Традиційним є застосування кумулятивних зарядів з конічними облицюваннями (далі лайнерами). Короткий огляд і аналіз останніх робіт в області кумуляції енергії вибуху показує, що крім енергії вибуху і швидкості детонації вибухової речовини на масово-кінетичні параметри кумулятивних струменів значно впливають форма і матеріал лайнера, а також схема збудження детонації [1–5]. У цій роботі зіставляються експериментальні дані, отримані на кумулятивних зарядах з конічними та напівеліптичними лайнерами, з аналогічними результатами чисельного моделювання. Крім того, проведено порівняння розподілу кінетичних параметрів руху матеріалу вздовж кумулятивного струменя (КС) для різних форм лайнерів з метою визначення найбільш перспективних з них.

Кумулятивний заряд (КЗ) – вибуховий пристрій, ефективність якого визначається глибиною пробиття перепони КС або енергією удару в осередку взаємодії КС, ударного ядра (УЯ), компактного елемента, які можуть утворюватися при сплескуванні лайнера. Одним з основних параметрів, що характеризують

ефективність роботи кумулятивних пристроїв, вважається глибина пробивання. Опосередковано про збільшення швидкості КС в експериментах з різними лайнерами або різними вибуховими речовинами (ВР) і одним матеріалом КС свідчить також збільшення вхідного діаметра [6]. Інколи навпаки збільшення вхідного діаметра призводить до зменшення глибини пробиття, що пов'язано з наявністю дрейфу (бокової компоненти швидкості КС) через технологічності похибки при виготовленні виробу. Проте в експериментах з однією формою лайнера (конус) спостерігається протилежний ефект: зменшення швидкості КС при заміні менш щільного матеріалу на більш щільний ( $Al \rightarrow Cu-Al \rightarrow Cu \rightarrow W-Cu-Pb$ ) веде до зменшення вхідного діаметра і збільшення глибини пробиття мішені [7, 8]. Ефект впливу матеріалу лайнера пояснюється двома конкуруючими механізмами: зміною внутрішньої енергії матеріалу в КС при стисненні і розширенні, яка залежить від пористості і стисливості матеріалу лайнера, і збільшенням внутрішньої енергії матеріалу КС у разі наявності реакційно активних компонентів (Al, Mg, PTFE тощо) [7–9].

**Мета статті** – узагальнення результатів авторських досліджень впливу форми КС, визначення шляхів остаточної оптимізації конструкції заряду, аналіз впливу матеріалів для виготовлення облицювань кумулятивної виїмки на їхню ефективність.

**Матеріали і методи досліджень.** Узагальнення авторських результатів досліджень. Методи чисельного та фізичного моделювання процесів детонації, кумуляції і проникання КС в тверді середовища [4, 7, 10].

**Результати досліджень.** Узагальнюючі результати досліджень, які частково були опубліковані в роботах [5, 11], можна сформулювати такі основні висновки:

1. Отримано залежність швидкості лідируючої частини мідного КС від кута у вершині конічного лайнера для швидкості детонації 7,8–8 км/с, що близька за формою до степеневі функції;

2. Залежність швидкості елементів уздовж КС близька до лінійної, а кут нахилу кривої залежить від форми та товщини лайнера.

Висновок 1 ілюструється графіком, який показує залежність головної, лідируючої частини КС від кута в вершині конічного лайнера (рис. 1). Він показує, що при зменшенні кута в вершині мідного конічного лайнера і наближенні його до значення  $2\alpha = 42^\circ$  (стандартний заряд [3, 4]), швидкість головної частини КС зростає і досягає значень 7700–7800 м/с на початковій стадії руху для потужних ВР (гексоген, октоген і їхні похідні: окфол, октол, ТГ 30/70 тощо). Схема збудження детонації – лінзова. На момент повного формування КС ( $\approx 70\text{--}80$  мкс) швидкість зменшувалася до величини 6800 м/с. Спроба збільшити цю величину здійснювалася шляхом чисельних експериментів для двох нестандартних конфігурацій лайнерів: біконічної і напівеліптичної (рис. 2–3). Основна ідея цих двох конструкцій – реалізація розгону лідируючої частини КС до максимальної швидкості  $V_0$ , яка забезпечує більшу глибину пробиття мішені. Адекватність теоретичної моделі детонації, деформації матеріалів лайнера і корпусу зарядів перевірялась експериментально шляхом вимірювання швидкості КС [12]. Результати чисельних експериментів наведено в таблиці 1.

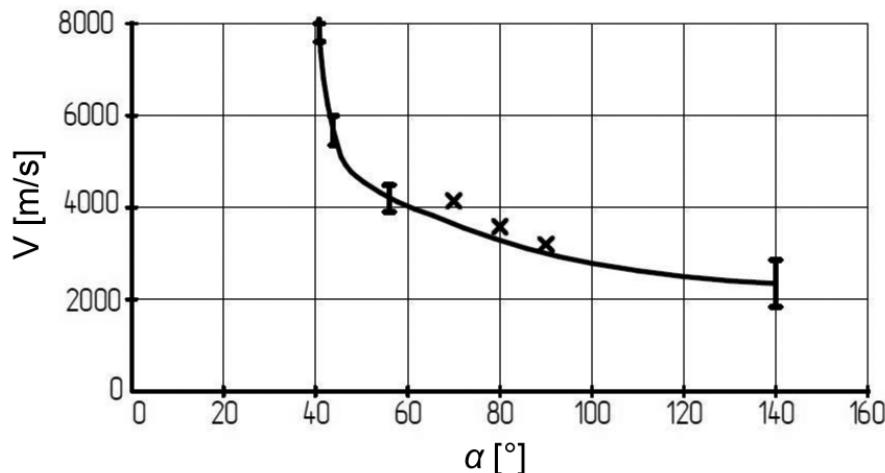


Рис. 1. Швидкість мідного КС як функція кута в вершині конічного лайнера для випадку збудження детонації із точки на осі симетрії

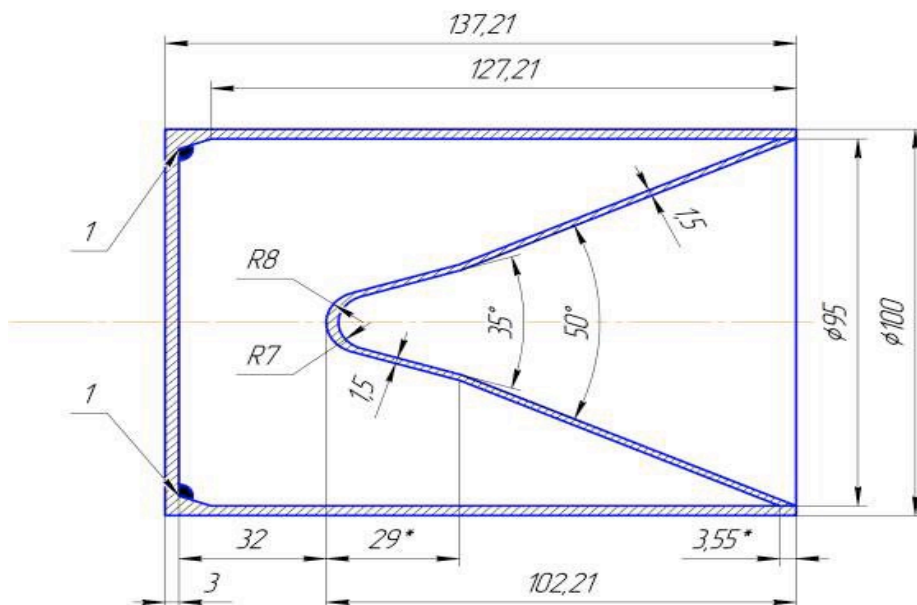


Рис. 2. Схема конструкції заряду з біконічним лайнером товщиною 1,5 мм:  
1 – контур ініціювання детонації

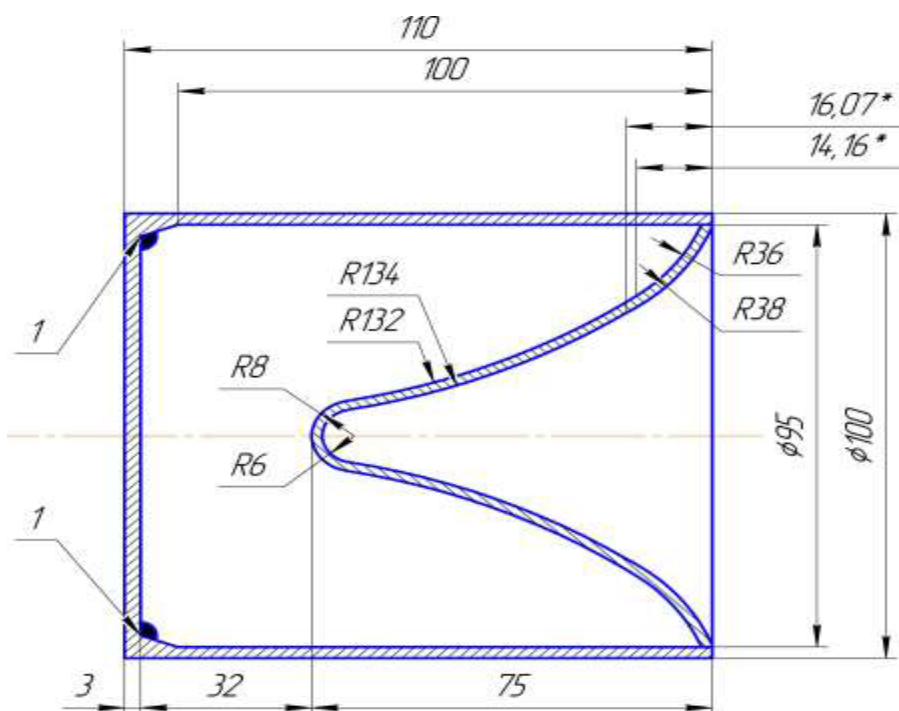


Рис. 3. Схема конструкції заряду з коротким еліптичним лайнером товщиною 2 мм:  
1 – контур збудження детонації

Таблиця 1

Зведені результати моделювання процесу функціонування кумулятивних зарядів з воронками у формі конуса за різних умов ініціації детонації заряду ВР

№ з/п	Форма кумулятивної воронки	Значення кута при вершині конуса, град.	Спосіб ініціації детонації заряду ВР	Швидкість руху головної частини КС, м/с	Швидкість руху задньої частини КС, м/с	Довжина КС, мм	Ефект. довжина КС, мм
1	Конічна постійної товщини 1,5 мм	42	кутова	6800	550	490	330
2	Конічна прогресивної товщини	42 та 43	кутова	5800	300	500	340
3			осьова	5000	220	450	250
4	Біконічна постійної товщини 2 мм	38 та 50	кутова	7000	560	450	300–320
5	Біконічна постійної товщини, 1,5–2,5 мм	35 та 50	кутова	8000–6733	500	450–500	350
6	Еліптична, коротка постійної товщини, 2 мм		кутова	6635	420	450	300
7			осьова	5150	250	450	250

Розкид значень швидкості КС для біконічного лайнера з кутами в вершині і при основі 35° та 50° показує залежність її від товщини і поступове зростання зі зменшенням товщини. Цю закономірність підтверджено в більшості робіт, присвячених вивченню кумуляції. На рисунку 4 показано розподіл швидкості вздовж КС, отриманий двома методами: за допомогою авторської програми «Гефест» [10] і за допомогою програмного продукту ANSYS/AUTODYN [5].

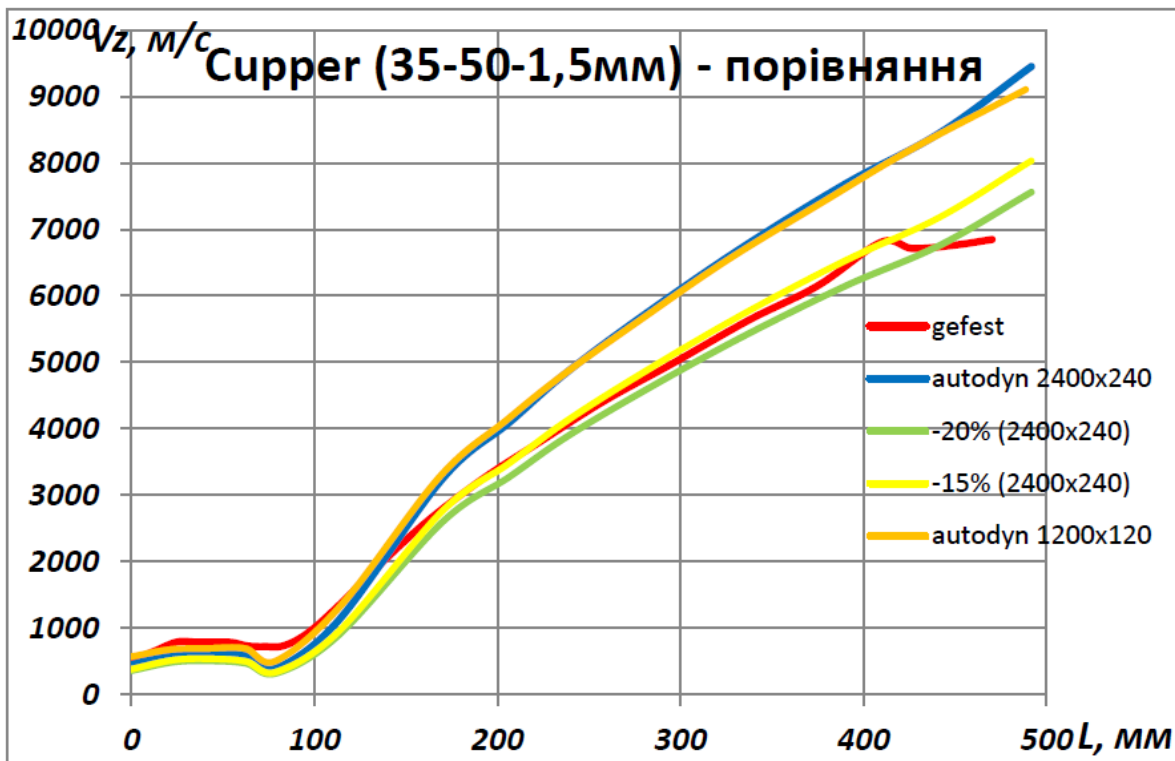


Рис. 4. Розподіл значень осевої швидкості вздовж КС для біконічного лайнера  $35^\circ/50^\circ$  з кутовою схемою ініціювання детонації товщиною 1,5 мм (1200x120 і 2400x240 – різний розмір сітки)

Як видно із наведених графіків, навіть при введенні поправки на результат, отриманий за програми ANSYS/AUTODYN, найбільші відмінності в швидкості спостерігаються в передній частині КС. При цьому різниця досить суттєва – приблизно 1000 м/с.

Глибина пробиття мішені оцінювалася за інженерною методикою DiPersio R., Simon J., Merendino A. згідно з моделлю A-V (Allison-Vitali) [5]:

$$L = z_0 \left[ \left( \frac{V_0}{V_c} \right)^{\frac{1}{\gamma}} - 1 \right], \quad (1)$$

$$0 \leq z_0 < V_c t_b \left( \frac{V_c}{V_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}}, \quad (2)$$

де  $V_c$  – швидкість хвостового елемента КС, коли припиняється його проникнення в перепону;  $\gamma = \sqrt{\rho_t / \rho_j}$ ;  $\rho_t$  – густина матеріалу мішені;  $\rho_j$  – густина матеріалу КС;  $z_0$  – відстань від заряду до мішені. Відповідно до гідродинамічної теорії  $L = (1 / \gamma) z_0$  і не залежить від градієнта швидкості вздовж КС.

Порівняємо глибину пробиття мішені із сталі Ст. 3 ( $V_c \approx 2000$  м/с) стандартним зарядом з кутом при вершині  $2\alpha = 42^\circ$  і зарядами з біконічними лайнерами ( $2\alpha = 38^\circ/50^\circ$  і  $2\alpha = 35^\circ/50^\circ$ ). Для мідного КС і сталеві мішені отримаємо відповідно  $L = 2,695z_0$ ;  $L = 2,738z_0$ ;  $L = (2,657 \dots 3,272)z_0$ .

Тобто заміна стандартного заряду з конічним лайнером (№ 2 в табл. 1) на біконічний лайнер (№ 5) дає можливість збільшити глибину пробиття на 1,6 %. Ця величина значно менша, ніж розкид значень в експериментах з промисловими кумулятивними зарядами (6–13 %) [13]. Але біконічний лайнер з кутами  $2\alpha = 35^\circ/50^\circ$  товщиною 1,5 мм дозволяє збільшити глибину пробиття вже на 21,4 % (верхнє значення), що перевищує вказаний діапазон розкиду. Проте остаточний висновок можна буде зробити після експериментальної перевірки. Одним з основних параметрів, що відповідає за масово-кінетичні характеристики КС, є ефективна його довжина, тобто ділянка, на якій всі елементи мають швидкість більшу, ніж  $V_c$ . З усіх розглянутих варіантів можна виділити № 2, 3, 5–7 (табл. 1).

Щодо еліптичної форми лайнера (рис. 3) розрахункові (табл. 1) і експериментальні дані (6029–6349 м/с) [14] показали, що цей варіант лайнера поступається стандартному заряду (№ 2). Очевидно, що така форма мас

бути більш видовжена для збільшення довжини КС. Один із варіантів показано на рисунку 5. Оптимальна висота лайнера може бути визначена в чисельних експериментах. Вона повинна бути більшою, ніж на рисунку 3. Крім того, варіювання відстані від тильної сторони заряду до вершини лайнера дозволяє вибрати оптимальний кут падіння хвилі детонації на стінку лайнера. На певній відстані від вершини лайнера до тильної сторони заряду може сформуватися хвиля і полічка Маха, тиск в якій в декілька разів вищий, ніж в площині Чепмена–Жуге за нормальної детонації. Це також сприяє збільшенню швидкості сплескування елементів лайнера і збільшенню швидкості передньої частини КС. Один із кращих варіантів – двошарова конструкція з внутрішнім зарядом з меншою швидкістю детонації і зовнішнім шаром з більшою швидкістю детонації [15].

Практичний інтерес становить оцінка пробиття мішені КС при схлопуванні комбінованого лайнера: вершина із матеріалу високої щільності (Mo, Mo-Cu, W-Cu, W-Pb тощо) все інше – мідь. Розрахунок для лайнера із Mo (вершина) і Cu (все інше) показує невелике збільшення глибини пробиття порівняно з суцільним мідним. Але ця конструкція також вимагає експериментальної перевірки

Все викладене вище стосується монолітної міді. Враховуючи неперервний розвиток технологій матеріалознавства, застосування порошків мікронного і субмікронного діапазону, позитивним було б поєднання запропонованих форм лайнерів і технологій порошкової металургії, які дозволяють залучити до виготовлення лайнера також важкі метали – W, Pb і Mo. Це сприяє збільшенню глибини пробиття щільних перепон порівняно з монолітною і пористою міддю [7–9, 12, 16, 17] (табл. 2).

Таким чином як результати чисельного моделювання, так і експериментальні дані показують, що зі зменшенням кута в вершині конічного лайнера збільшується швидкість передньої частини КС і глибина пробиття мішені. Проте не все так просто і однозначно в процесі реалізації переваг конічних лайнерів з гострими кутами в вершинах. У таблиці 2 представлено результати офіційних залікових випробувань КЗ з конічними лайнерами з кутами в вершині  $2\alpha = 70^\circ$ ,  $2\alpha = 55^\circ/60^\circ$ ,  $44^\circ/48^\circ$  і еліптичним коротким лайнером. Конічні лайнери були виготовлені із порошкової міді і композиту (порошки W-Cu-Pb, 70-20-10 %, мас.). Еліптичні – із монолітної міді марки М1. Кількість зарядів для випробувань в окремій партії (виборці) змінювалася від чотирьох до тринадцяти. Калібри зарядів дорівнювали відповідно 26,2 мм, 26 мм, 30 мм і 30 мм. Позначення в таблиці 2:  $L_{av}$ ,  $L_{max}$ ,  $L_{min}$  – середнє, максимальне і мінімальне значення глибини пробиття мішені (сталь Ст. 3) у виборці.

Таблиця 2

Результати залікових випробувань КЗ з конічними і еліптичним лайнерами

№ з/п	$2\alpha,^\circ$	L, мм	$L_{av}$ , мм	$L_{max} - L_{av}$ , мм/%	$L_{av} - L_{min}$ , мм/%	Матеріал лайнера	Вибуховий матеріал
1	70	50–58	54,0	4,0/7,4	4,0/7,4	Cu	Гексоген флегматизований
2	55/60*	70–76	73	3,0/4,1	3,0/4,1	Cu	–"
3	55/60**	109–116	112,5	3,5/3,1	3,5/3,1	W-Cu-Pb	–"
4	44/48***	96–147	121,5	25,5/21,0	25,5/21,0	W-Cu-Pb	–"
5	44/48	116–150	133	17/12,78	17/12,78	W-Cu-Pb	–"
6	44/48	80–95	85	5/5,88	5/5,88	Cu	–"
7	Еліпс	60–100	80	20/25	20/25	Cu	ТГ 30/70

Примітки: \*відстань до першої перепони 8,5 мм;

\*\*відстань до першої перепони 35 мм;

\*\*\*КЗ у свинцевій оболонці і зовнішньому корпусі зі скла. Всі інші – корпус із сталі Ст. 45

Як видно із наведених даних, при зменшенні кута в вершині лайнера збільшується розкид значень глибини пробиття і величини відхилення її від середнього значення. Це свідчить про зниження стабільності функціонування заряду. Можливими причинами цього є збільшення величини дрейфу – бокової компоненти швидкості КС, вплив локальних неоднорідностей у композитному матеріалі лайнера (густина, пористість) внаслідок неякісного перемішування порошків на стадії підготовки до пресування, зношення інструменту для пресування лайнера і заряду і, як наслідок, конструкційні і технологічні похибки [17, 18]. Можливо має місце вплив нестійкості Релея–Тейлора при сходженні багатокомпонентного матеріалу лайнера до осі симетрії. Тому надзвичайно високе, якщо не основне, значення для реалізації КЗ з лайнерами нетрадиційних форм має точність виготовлення лайнера і заряду в цілому і якість (однорідність) композитного матеріалу лайнера.

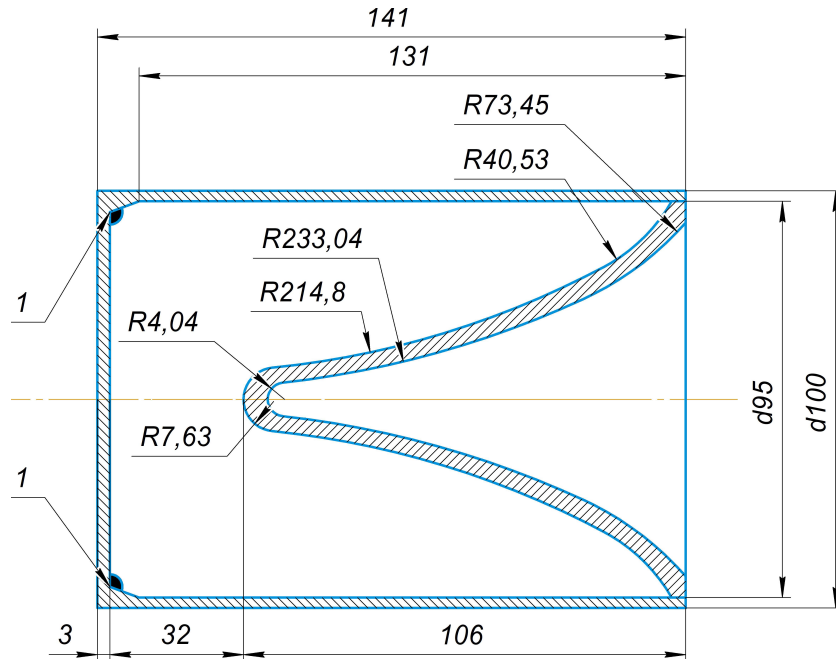


Рис. 5. Схема конструкції заряду з довгим еліптичним лайнером

**Висновки:** 1. Результати математичного моделювання і експериментальних досліджень показали, що перспективними формами облицювань кумулятивних зарядів глибокого пробиття можуть бути двоконічний і еліптичний лайнери. Для завершення досліджень з оптимізації форми лайнерів необхідно провести ряд чисельних експериментів з лайнерами двоконічної і еліптичної форми і провести експериментальну перевірку функціонування оптимізованих конструкцій зарядів;

2. Зі зменшенням кута при вершині конічного лайнера збільшується нестабільність функціонування промислових зарядів і розкид глибини пробиття мішені. Тому основною умовою стабілізації значення глибини пробиття є точність виготовлення виробу.

Робота виконувалася в межах цільової програми НАН України.

#### Список використаної літератури:

1. *Elshenawy T.* Experimental and numerical investigation of zirconium jet performance with different liner shapes design / *T.Elshenawy, Q.-m.Li, A.Elbeih* // *Def. Technol.* – 2022. – Vol. 18, Issue 1. – P. 12–25. DOI: 10.1016/j.dt.2020.11.019.
2. The Shooting Tests of Target Perforating Ability, Performed on Cast Concrete Cylinders / *L.Habera, K.Hebda, P.Košlik, T.Salaciński* // *Cent. Eur. J. Energ. Mater.* – 2020. – Vol. 17, Issue 4. – P. 584–599. DOI: 10.22211/cejem/132066.
3. *Walters W.* Introduction to Shaped Charges / *W.Walters.* – Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD 21005-5069. ARL-SR-150. – 2007. – 110 p.
4. *Walters W.* The Penetration Resistance of a Titanium Alloy against Jets From Tantalum Shaped Charge Liners / *W.Walters, W.Gooch, M.Burkins* // *Combustion, explosion and shock waves.* – 2000. – № 6. – P. 745–750.
5. On the influence of the liner shape and charge detonation scheme on the kinetic characteristics of shaped charge jets and explosively formed penetrator / *Yu.Voitenko, Yu.Sydorenko, R.Zakusylo and other* // *Cent. Eur. J. Energ. Mater.* – 2023. – Vol. 20, № 4. – P. 417–441.
6. *Cook M.A.* The science of industrial explosives / *M.A. Cook.* – Salt Lake City, Utah : IRECO Chemicals, 1974.
7. *Voitenko Yu.I.* Influence of the Striker Material on the Results of High-Speed Impact at a Barrier / *Yu.I. Voitenko, R.V. Zakusylo, S.Zaychenko* // *Cent. Eur. J. Energ. Mater.* – 2021. – Vol. 18, № 3. – P. 405–423.
8. New Functional Materials in Mechanical Engineering and Geology / *Yu.I. Voitenko, R.V. Zakusylo, A.T. Wojewodka and other* // *Cent. Eur. J. Energ. Mater.* – 2019. – Vol. 16, № 1. – P. 135–149. DOI: 10.22211/cejem/105598.
9. Application of sintered liners for explosively formed projectile charges / *J.Borkowski, Z.Wilk, P.Koslik and other* // *International Journal of Impact Engineering.* – 2018. – Vol. 118. – P. 91–97.
10. Spatial Distribution of Mass and Speed on Movement of Two Shrapnel Discs of Variable Thickness in Explosive Load / *Yu.Sydorenko, B.Semon, V.Yakovenko and other* // *Defence Science Journal.* – 2020. – Vol. 70. – P. 479–485.

11. Фізичні і матеріалознавчі основи підвищення ефективності бронепробиття кумулятивними зарядами / Ю.І. Войтенко, Ю.М. Сидоренко, В.В. Бойко та інші // Гідродинаміка і акустика. – 2024. – Т. 3 (93), № 1. – С. 1–16.
12. Mechanical Effect of Shaped Charges with Porous Liners / Yu.I. Voitenko, S.V. Goshovskii, A.G. Drachuk, V.P. Bugaets // *Combust. Explos. Shock Waves*. – 2013. – Vol. 49, № 1. – P. 109–116.
13. Peculiarities of Brittle and Ductile Materials Destruction and Deformation During the Explosion of Industrial Shaped Charges / Yu.Voitenko, V.Kravets, A.Shukurov, O.Drachuk // *Min. Miner. Deposits*. – 2017. – Vol. 11, № 2. – P. 12–20.
14. Звіт про науково-дослідну роботу «ІГМ-2022/1» ; № ДР: 0122U002388. – Київ : Інститут гідромеханіки НАН України, 2024. – 281 с.
15. Zhang X.-F. Studies on jet formation and penetration for a double-layer shaped charge / X.-F.Zhang, L.Qiao // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 2011. – Vol. 47. – P. 241–248.
16. Study on Penetration Performance of Rear Shaped Charge Warhead / Y.Du, G.He, Y.Liu and other // *Materials*. DOI: 10.3390/ma14216526.
17. Войтенко Ю.І. Матеріалознавчі аспекти ефективності вибухової кумуляції / Ю.І. Войтенко, С.В. Гошовський, Р.В. Закусило // *Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво : матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції, 23–25 листопада*. – Шостка, 2022. – С. 56–59.
18. Про оптимальні конструкції і матеріали кумулятивних зарядів для деяких практичних застосувань / Ю.І. Войтенко, С.В. Гошовський, О.О. Костюк, А.М. Пасічник // *Технічна інженерія*. – 2023. – № 1 (91). – С. 287–297.

#### References:

1. Elshenawy, T., Li, Q.-m. and Elbeih, A. (2022), «Experimental and Numerical Investigation of Zirconium Jet Performance with Different Liner Shapes Design», *Def. Technol.*, Vol. 18, Issue 1, pp. 12–25, doi: 10.1016/j.dt.2020.11.019.
2. Habera, Ł., Hebda, K., Koślik, P. and Sałaciński, T. (2020), «The Shooting Tests of Target Perforating Ability, Performed on Cast Concrete Cylinders», *Cent. Eur. J. Energ. Mater.*, Vol. 17, Issue 4, pp. 584–599, doi: 10.22211/cejem/132066.
3. Walters, W. (2007), *Introduction to Shaped Charges*, Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD 21005-5069. ARL-SR-150, 110 p.
4. Walter, W., Gooch, W. and Burkins, M. (2000), «The Penetration Resistance of a Titanium Alloy against Jets From Tantalum Shaped Charge Liners», *Combustion, explosion and shock waves*, No. 6, pp. 745–750.
5. Voitenko, Yu., Sydorenko, Yu., Zakusylo, R. et al. (2023), «On the influence of the liner shape and charge detonation scheme on the kinetic characteristics of shaped charge jets and explosively formed penetrator», *Cent. Eur. J. Energ. Mater*, Vol. 20, No. 4, pp. 417–441.
6. Cook, M.A. (1974), *The science of industrial explosives*, IRECO Chemicals, Salt Lake City, Utah.
7. Voitenko, Yu.I., Zakusylo, R.V. and Zaychenko, S. (2021), «Influence of the Striker Material on the Results of High-Speed Impact at a Barrier», *Cent. Eur. J. Energ. Mater*, Vol. 18, No. 3, pp. 405–423.
8. Voitenko, Yu.I., Zakusylo, R.V., Wojewodka, A.T. et al. (2019), «New Functional Materials in Mechanical Engineering and Geology», *Cent. Eur. J. Energ. Mater.*, Vol. 16, No. 1, pp. 135–149, doi: 10.22211/cejem/105598.
9. Borkowski, J., Wilk, Z., Koslik, P. et al. (2018), «Application of sintered liners for explosively formed projectile charges», *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 118, pp. 91–97.
10. Sydorenko, Yu., Semon, B., Yakovenko, V. et al. (2020), «Spatial Distribution of Mass and Speed on Movement of Two Shrapnel Discs of Variable Thickness in Explosive Load», *Defence Science Journal*, Vol. 70, pp. 479–485.
11. Voitenko, Yu.I., Sydorenko, Yu.M., Boiko, V.V. et al. (2024), «Фізичні і матеріалознавчі основи підвищення ефективності бронепробиття кумулятивними зарядами», *Гідродинаміка і акустика*, Vol. 3 (93), No. 1, pp. 1–16.
12. Voitenko, Yu.I., Goshovskii, S.V., Drachuk, A.G. and Bugaets, V.P. (2013), «Mechanical Effect of Shaped Charges with Porous Liners», *Combust. Explos. Shock Waves*, Vol. 49, No. 1, pp. 109–116.
13. Voitenko, Yu., Kravets, V., Shukurov, A. and Drachuk, O. (2017), «Peculiarities of Brittle and Ductile Materials Destruction and Deformation During the Explosion of Industrial Shaped Charges», *Min. Miner. Deposits*, Vol. 11, No. 2, pp. 12–20.
14. *Zvit pro naukovo-doslidnu robotu «IHM-2022/1», No. DR 0122U002388*, (2024), Instytut hidromekhaniky NAN Ukrainy, Kyiv, 281 p.
15. Zhang, X.-F. and Qiao, L. (2011), «Studies on jet formation and penetration for a double-layer shaped charge», *Combustion, Explosion, Shock Waves*, Vol. 47, pp. 241–248.
16. Yanan, D., Guanglin, H., Yukuan, L. et al., «Study on Penetration Performance of Rear Shaped Charge Warhead», *Materials*, doi: 10.3390/ma14216526.
17. Voitenko, Yu.I., Hoshovskiy, S.V. and Zakusylo, R.V. (2022), «Materialознавчі аспекти ефективності вибухової кумуляції», *Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво, матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції, 23–25 листопада, Шостка*, pp. 56–59.
18. Voitenko, Yu.I., Hoshovskiy, S.V., Kostyuk, O.O. and Pasichnyk, A.M. (2023), «Pro optimalni konstruktsii i materialy kumulyativnykh zaryadiv dlia deiakykh praktychnykh zastosuvan», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 1 (91), pp. 287–297.



**Войтенко** Юрій Іванович – доктор технічних наук, провідний науковий співробітник Інституту гідромеханіки НАН України.

<https://orcid.org/0000-0003-3077-2207>.

Наукові інтереси:

- руйнування гірських порід і конструкційних матеріалів;
- розробка родовищ корисних копалин.

E-mail: voytenkou@gmail.com.

**Гошовський** Сергій Володимирович – доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник Наукового гідрофізичного центру НАН України.

<https://orcid.org/0000-0002-8312-6244>.

Наукові інтереси:

- промислова геологія і геофізика;
- розробка родовищ корисних копалин.

E-mail: sergejgeofizik@gmail.com.

**Сидоренко** Юрій Михайлович – доктор технічних наук, професор, начальник наукової частини Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0000-0001-8780-9459>.

Наукові інтереси:

- механіка деформованого твердого тіла;
- озброєння і боєприпаси.

E-mail: yura\_michael@ukr.net

**Пасічник** Андрій Михайлович – кандидат технічних наук, науковий співробітник Інституту гідромеханіки НАН України.

<https://orcid.org/0009-0008-0430-3953>.

Наукові інтереси:

- сейсмічна безпека техногенних вибухів.

E-mail: passichnyk@gmail.com.

**Voitenko Yu.I., Goshovskii S.V., Sydorenko Yu.M., Pasitshnik A.M.**

#### **On optimal designs of cumulative charges of deep penetration**

**Purpose.** Generalization of the results of the author's research on the influence of the shape of the liner on the mass-kinetic characteristics of the jets, the determination of the ways of the final optimization of the design of the charge, the analysis of the combined effect of the shape and liners materials on the efficiency of the charges

**Method.** The methodological basis of research is a systematic approach to the problem of increasing the efficiency of a cumulative explosion. In accordance with the specifics of research aimed at achieving the set goals and obtaining technological dependencies, physical and mathematical modeling were used in the work.

**Findings.** The results of a comparison of the parameters of the functioning of shaped charges with three forms of liners are presented: conical with an angle at the top of  $2\alpha=42^\circ$  of constant thickness, progressive thickness with an angle at the top of  $42^\circ/43^\circ$ , biconical with angles at the top and base of  $38^\circ/50^\circ$  and  $35^\circ/50^\circ$  and semi-elliptical. In some cases, different detonation excitation schemes were simulated. From a point on the axis of symmetry and around a circle with a diameter equal to the caliber of the charge. A comparison of the simulation results with the data of experimental studies for a short semi-elliptical liner. The results of the penetration depth of shaped charges jets into the barrier according to the A-V model (Allison and Vitali) were compared for a standard charge ( $2\alpha=42^\circ$ ), biconical and semi-elliptical liners.

**Originality.** Bi-conical and elliptical liners are promising forms of liners of shaped charges of deep penetration, which make it possible to form shaped charges jets that move at velocity greater than the velocity of the jet when detonating a standard shaped charges blow up with a conical liner.

As the angle at the top of the conical liner decreases, the instability of the functioning of industrial charges increases and the spread of the penetration depth of the target increases

**Practical implications.** The obtained results are important and useful for the design of equipment and technologies in various fields where the energy of a directed explosion is used: for the disposal and disposal of ammunition, for the opening of oil and gas reservoirs, for the reconstruction of construction facilities, in military affairs.

**Keywords:** shaped charge; detonation; liner; shaped charge jet; penetration depth

Стаття надійшла до редакції 25.04.2024.