

DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2023-1\(91\)-287-297](https://doi.org/10.26642/ten-2023-1(91)-287-297)  
УДК 622.235.5:622.26+539.4

**Ю.І. Войтенко, д.т.н.**  
Інститут гідромеханіки НАН України  
**С.В. Гошовський, д.т.н., проф.**  
Науковий гідрофізичний центр НАН України  
**О.О. Костюк, головний спеціаліст**  
Секція прикладних проблем НАН України  
**А.М. Пасічник, к.т.н.**  
Інститут гідромеханіки НАН України

## Про оптимальні конструкції і матеріали кумулятивних зарядів для деяких практичних застосувань

**Мета.** Огляд і аналіз результатів досліджень функціонування кумулятивних зарядів з різними лайнерами для прогнозу або отримання кореляційних залежностей типу «швидкість детонації ВР – швидкість елементів кумулятивних струменів (КС)», «кут у вершині конічного лайнера – швидкість КС»; оцінювання і експериментальна перевірка інженерних теорій проникання КС в цільні матеріали для проектування зарядів у практичних застосуваннях; аналіз ефективності кумулятивних зарядів (КЗ) з лайнерами із різних матеріалів.

**Методика.** Методичну основу досліджень становить системний підхід до проблеми підвищення ефективності кумулятивного вибуху. Відповідно до специфіки досліджень, спрямованих на досягнення поставлених завдань та отримання технологічних залежностей, у роботі використовувалися переважно аналітичний, графоаналітичний методи та фізичне і математичне моделювання.

**Результати.** Виявлено кількісні взаємозв'язки швидкості головної частини КС від швидкості детонації вибухової речовини в заряді з кутом у вершині конічного лайнера  $42^\circ$  і залежність швидкості головної частини КС від кута у вершині конічного мідного лайнера. Проаналізовано інженерні теорії проникання КС в цільні перепони. Показано, що найкращі результати, які близькі до експериментальних даних, прогнозує теорія на засадах моделі A–V (Allison і Vitali). Визначено найбільш перспективні матеріали для лайнерів кумулятивних зарядів з метою збільшення глибини пробиття або діаметра при неглибокому пробиванні. Розглянуто деякі практичні застосування КЗ, зокрема, знешкодження і утилізація боєприпасів і нетрадиційні методи руйнування залізобетону і гірських порід.

**Наукова новизна.** Встановлено лінійну залежність швидкості КС від швидкості детонації вибухової речовини для заряду з конічним лайнером і кутом у вершині  $42^\circ$ , а також залежність швидкості КС від кута у вершині конічного мідного лайнера, яка близька до степеневий, для швидкості детонації ВР  $\approx 7800\text{--}8000$  м/с.

**Практична значущість.** Отримані результати є важливими та корисними для проектування 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; лайнер; детонація; кумулятивний струмінь; ударне ядро; проникання.

**Вступ.** Кумулятивний заряд (КЗ) – вибуховий пристрій, ефективність якого визначається глибиною пробиття кумулятивного струменя (КС) або енергією удару в осередку взаємодії КС, ударного ядра (УЯ) або компактного елемента, які можуть утворюватися при сплескуванні лайнера (облицювання). За останні 15–20 років потік робіт, присвячених дослідженням функціонування КЗ, помітно збільшився. В основному це відбулося завдяки появі кількох програмних продуктів, які дозволяють проводити комп'ютерне моделювання основних процесів, які супроводжують вибух КЗ: детонацію вибухової речовини (ВР), деформацію корпусу КЗ, сплескування лайнера з утворенням КС, УЯ або компактного елемента і проникання КС або УЯ в перепону. В багатьох роботах результати розрахунків і адекватність моделей поведінки матеріалів перевірялися в експериментах або порівнювалися з іншими результатами досліджень [1–10]. Ряд робіт присвячено вивченню матеріалознавчих аспектів функціонування КЗ [11–16]. Побіжний огляд робіт дозволяє виокремити основні чинники, які визначають глибину і об'єм каналу: товщину, форму і матеріал лайнера, енергію вибуху, схему збудження детонації. Проте низка практичних застосувань кумулятивного вибуху потребує оцінки або точних розрахунків масово-кінетичних параметрів КС або УЯ, а також достатньо ефективних інженерних методів оцінки глибини проникання КС і УЯ в перепону. В роботі коротко описані деякі практичні застосування КЗ.

**Мета роботи** – огляд і аналіз результатів досліджень функціонування кумулятивних зарядів з різними лайнерами для прогнозу або отримання кореляційних залежностей типу «швидкість детонації ВР – швидкість елементів КС і УЯ», «кут у вершині конічного лайнера – швидкість КС»; оцінювання і перевірка інженерних теорій проникання КС в цільні матеріали для проектування зарядів у практичних застосуваннях; аналіз ефективності КЗ з лайнерами із різних матеріалів.

**Матеріали і методика.** Узагальнення авторських результатів досліджень та результатів інших авторів. Порівняння результатів розрахунків глибини пробиття за різними інженерними теоріями з експериментальними результатами досліджень авторів. Розрахунки і чисельні оцінки для деяких практичних застосувань кумулятивних зарядів

Експерименти проводилися за стандартною методикою, яка використовується багатьма дослідниками [2–4, 6, 7]. Заряд встановлювався на мішень на підставці, висота якої визначала відстань від заряду до мішені. Мішень виготовлялась із пакета сталевих пластин (Ст3) товщиною 8–10 мм (рис. 1). У зарядах використовувалися бризантні вибухові речовини: флегматизовані гексоген (ГФ) або октоген (окфол). Лайнери виготовлялися із мідного порошку з невеликою добавкою пластифікатора (свинець, 5–10 %, мас.) методом одностороннього холодного пресування.

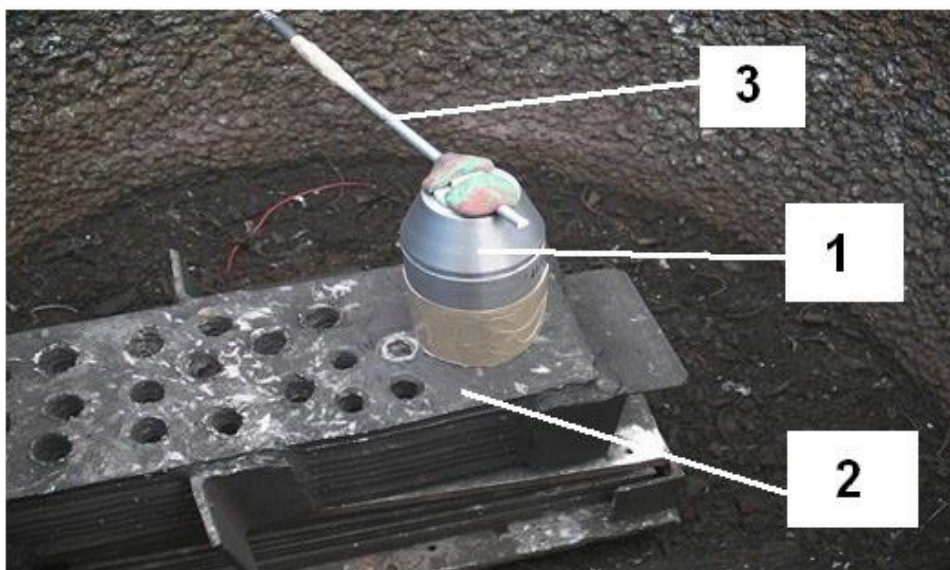


Рис. 1. Загальний вигляд експериментальної установки: заряд (1), мішень (2), детонуючий шнур (3)

#### Результати досліджень і їх обговорення.

**Знешкодження боєприпасів.** Однією з найгостріших проблем для України на сьогодні є проблема знешкодження боєприпасів (мінометних мін різних калібрів; артилерійських снарядів; авіаційних бомб; інженерних боєприпасів; реактивних снарядів; ракет тощо). Гострота цієї проблеми збільшується в міру продовження бойових дій і вимагає розробки ефективних методів знешкодження, які б мінімально впливали на довкілля. Основними чинниками впливу на довкілля у разі детонації боєприпасу, наприклад, накладним зарядом, є повітряна ударна хвиля, сейсмічна хвиля і розліт фрагментів корпусу боєприпасу. Їх величина і радіус дії збільшується в міру збільшення маси вибухової речовини (ВР). Тому надзвичайно великий практичний інтерес мають методи знешкодження без детонації ВР, особливо в умовах заглиблення боєприпасу в товщу ґрунтового масиву. Один із них запропонований авторами в складі кількох технічних рішень [11–12].

В Україні над вирішенням цієї проблеми працюють також працівники спеціалізованих установ Міністерства оборони [13]. Необхідно згадати також розробки нашого сусіда, який створив нам цю проблему і продовжує нарощувати її масштаб, особливо поблизу ліній розмежування і на звільнених територіях [14]. У [13] описано результати розробки та випробувань малогабаритних кумулятивних зарядів (КЗ) з конічними і напівсферичними облицюваннями із заліза. Склад ВР і швидкість детонації не вказані. Кінематичні характеристики кумулятивних струменів (КС) не визначалися. Наскільки можна зрозуміти результати випробувань, показали нестабільність роботи зарядів і їх дії на боєприпас: при встановленні КЗ на фокусних відстанях 35–60 мм детонація у вибухових мішенях збуджувалася; при встановленні КЗ із напівсферичним облицюванням на відстанях 40 мм детонація інколи була відсутня. Крім того, досліджувалося руйнування оболонки заряду (боєприпасу) вибухом КЗ, який встановлювався на відстані 200–450 мм. Наскільки зрозуміло із тексту роботи остаточного вирішення вказаного завдання автори не отримали. Тому запропоновані деякі інші варіанти зарядів.

У літературі є деякі відкриті дані щодо збудження детонації відкритих зарядів і зарядів в оболонках високошвидкісними компактними ударниками (КУ) і КС [16]. Критерієм наявності або відсутності детонації у ВР при ударі КУ або КС слугує умова, запропонована М.Хельдом [17]:

$$G \geq G_{кр}, \quad (1)$$

де  $G_{кр}$  – характеристика критичного рівня дії на ВР.

Хельдом М. запропоновано кількісну оцінку величини  $G_{кр}$  у вигляді  $G_{кр} = v^2 d$  ( $v$  – швидкість КУ або КС;  $d$  – діаметр), в інших роботах  $G_{кр} = \rho v^2 d$  ( $\rho$  – щільність матеріалу КС або КУ).

Згідно з [16] для пресованого тротилу щільністю  $1.52 \text{ г/см}^3$  величина  $G_{кр}$  становить  $25 \text{ мм}^3/\text{мкс}^2$ . Для литого тротилу щільністю  $1.57 \text{ г/см}^3$  величина  $G_{кр}$  становить  $65 \text{ мм}^3/\text{мкс}^2$  для КС діаметром  $1,5 \text{ мм}$  при дії на закритий заряд. Для ТЕНу щільністю  $1,77 \text{ г/см}^3$  при дії КС діаметром  $0,4 \dots 1,1 \text{ мм}$  величина  $G_{кр}$  становить  $13 \text{ мм}^3/\text{мкс}^2$ ; для ТГ 40/60 щільністю  $1,72 \text{ г/см}^3$  –  $29 \text{ мм}^3/\text{мкс}^2$ .

Виходячи з цих та інших даних із [16] та інших джерел інформації, перед вибором конструкції (дизайну) КЗ бажано провести чисельні оцінки кінематичних параметрів і діаметра КС або КУ з використанням наближених або точних методів розрахунку. Крім того, в літературі достатньо багато експериментальних і розрахункових даних для зарядів різних калібрів з різними формами облицювань, які дають можливість оцінити величину  $G_{кр}$ . Покажемо це на окремих прикладах і зарядах, які автори досліджували в фізичних і в чисельних експериментах з урахуванням результатів досліджень інших авторів.

Для мідного конічного лайнера з кутом при вершині  $55\text{--}60^\circ$  швидкість головної частини КС згідно з розрахунковими і експериментальними даними [18] становить близько  $4000 \dots 4300 \text{ м/с}$ . ВР в заряді (RDX) мала швидкість детонації  $7800\text{--}8100 \text{ м/с}$ . Діаметр КС –  $\approx 2.0 \dots 2,1 \text{ мм}$  [19]. Для  $v = 4000 \text{ м/с}$  і  $d = 2,1 \text{ мм}$   $G = 33,6 \text{ мм}^3/\text{мкс}^2$ . Тобто всі ВР, починаючи з пресованого тротилу, мають детонувати при дії такого КС. В той же час ударне ядро, яке утворювалося при детонації КЗ калібром  $30 \text{ мм}$  у разі октогену (HMX) характеризується таким оціночним значенням  $G = 30,6 \text{ мм}^3/\text{мкс}^2$ , у разі тротилу (TNT)  $G = 19,04 \text{ мм}^3/\text{мкс}^2$  [20]. В розрахунках бралось до уваги, що поперечний розмір КУ (ударного ядра) становить приблизно  $25\text{--}30 \%$  від початкового розміру облицювання (сферичного сегмента). Проте інколи (залежно від матеріалу) поперечний розмір УЯ становить  $\approx 50\text{--}60 \%$  від початкового діаметра лайнера [20–25]. Зменшенню величини  $G$  сприяє також заміна корпусу КЗ, наприклад, зі сталі на алюміній. Ці оцінки показують, що, змінюючи конструкцію заряду і зменшуючи швидкість детонації, можна добитися виконання чи невиконання умови (1) і забезпечити відсутність детонації при руйнуванні боєприпасу вибухом кумулятивного заряду або її наявності у разі необхідності. Зауважимо, що при виборі конструкцій пристроїв динамічного захисту і матеріалів для них також має значення перевірка і виконання критерію (1) і експериментальне визначення значення величини  $G_{кр}$  для конкретного ВР.

Враховуючи те, що у інженерів-конструкторів як правило бракує високоякісних програмних продуктів для розрахунків масово-швидкісних характеристик КС і КУ, корисною була б довідникова інформація щодо кореляційних залежностей швидкості, геометричних розмірів і мас КС і КУ від швидкості детонації ВР, конструкції КЗ (відкритий чи закритий); схема збудження детонації, товщина, форма і матеріал лайнера) або прості інженерні формули для їх визначення. Не претендуючи на повноту даних щодо масово-швидкісних характеристик КС і УЯ, наведемо деякі характеристики для зарядів, які були використані в експериментах і для яких проводилося чисельне моделювання процесів функціонування КЗ (детонації, формування КС або УЯ) (табл. 1).

Близькі до наведених значень параметрів для УЯ можна знайти також в інших роботах, наприклад у [25]. Якщо побудувати залежність швидкості головної частини КС  $v_0$  від швидкості детонації ВР  $D$  для стандартного КЗ з кутом у вершині конуса  $42^\circ$ , то можна впевнитися, що експериментальні точки практично лягають на пряму лінію (перші сім рядків). Практично на пряму лінію, яка проходить через початок координат лягають експериментальні значення глибини проникання КС (два нижні рядки). Те саме можна стверджувати щодо залежності швидкості УЯ від швидкості детонації [20] (табл. 1). Як буде показано нижче, глибина пробивання перепони до моменту розриву КС лінійно залежить від його швидкості. Тому із фізичних міркувань зменшення швидкості детонації буде призводити до зменшення глибини пробиття в лінійному наближенні, що і показують експериментальні дані. Екстраполюючи залежність  $v_0(D)$  в бік зменшення швидкості детонації, можна бачити, що за  $D = (2 \dots 4) \text{ км/с}$  значення швидкості КС буде також в цьому діапазоні. Це підтверджують результати досліджень у [24].

Кінематичні характеристики КС і УЯ для зарядів різних калібрів і різних форм облицювань кумулятивних виїмок

Вибухова речовина	Швидкість детонації, км/с	Матеріал лайнера / товщина, мм	Форма лайнера, кут при вершині конуса, град.	Швидкість КС, УЯ, км/с; або відносна глибина проникання* Час до розриву КС, мкс	Діаметр лайнера $d_c$ / КС (УЯ), мм; Джерело
Склад В, 150 $\mu$ , RDX	7,92	Cu / 1,9–2,05	Конус, 42	7,8/154	95 / 2–3; [21]
RX-08-FO, 60 $\mu$ HMX, NP	8,02	-"	-"	8,0/154	
RX-08-GB, 8 $\mu$ HMX, FEFO	8,24	-"	-"	8,3/168	
RX-08-GG, 60 $\mu$ HMX, FEFO	8,24	-"	-"	8,1/173	
OCTOL 75/25, 470 $\mu$ HMX	8,48	-"	-"	8,5/174	
RX-08-EL, 60 $\mu$ HMX, FEFO	8,51	-"	-"	8,6/176	
Пентоліт	7,47	Сталь / 2,0	Конус, 45	7,5	41 / 2–3; [21]
HMX	8,6	Cu / 1,4–2,6	Конус, 60	9,6	95 / 1–3; [9]
RDX	7,8	Cu / 1,4–2,5	Конус, 55/60	4,3	26 / 1,9–2; [18]
RDX	8,1	Cu / 1,5–2	Сферичний сегмент	1,75	30 / 8,1; [22]
HMX	8,5	Cu / 3–4	Конус, 140	1,56	60 / 15; [23]
K ClO <sub>4</sub> +Mg	2,1	Al / 0,5–1	Сфера	3,66	10 / 1-3; [24]
HMX	9,11	Cu / 3–5	Сферичний сегмент	1,750	30 / 20; [20]
TNT	6,94	-"	-"	1,38	30 / 20; [20]
Склад В	7,62	-"	-"	1,635	30 / 20; [20]
		Al / 3–5	-"	3,52	30 / 20; [20]
Emulex 700	5,0–5,5	Cu / 1	Конус, 30	Відсутня КС	30; [26]
-"	-"	Cu / 1	Конус, 42	1,5*	30; [26]
PE	8,09	Cu / 1	Конус, 42	3,1*	30; [26]

Необхідно зазначити, що УЯ, в англомовній літературі «explosively formed projectiles», утворюється лише при вибуховому метанні лайнерів у вигляді низько сферичних сегментів або конусів з тупими кутами  $\geq 140^\circ$ . При цьому в УЯ переходить більше 80 % маси лайнера. В усіх інших випадках утворюється КС незалежно від форми лайнера: конус, сфера та інші форми [21, 16–24]. В КС переходить від  $\approx 50\%$  і більше маси лайнера (сфера, в тому числі дегресивної товщини) і до 12–22 % (конус, еліпс, гіпербола тощо) [14].

Привабливою є ідея застосування ВР місцевого приготування на основі сумішей АС-АІ-ПАР [11–12]. Швидкість детонації цих ВР залежно від рецептури і конструкції заряду (в жорсткій оболонці, гнучкій оболонці, відкритому заряді) коливається в межах 1–2,5 км/с, ігданіту – 2,4–3 км/с. КС від вибуху таких зарядів будуть рухатися зі швидкостями, які не перевищують  $\approx 2 \dots 3$  км/с (сталь) і  $\approx 3 \dots 4$  (АІ), а УЯ – зі швидкостями не більше кількох сотень м/с. Умова (1) при цьому буде виконуватися автоматично.

**Матеріали для глибокого пробиття перепон.** Заряди для глибокого пробиття перепон використовуються як для цивільних технологій, так і для військових [1–8, 13, 18]. У [27] сформульовано грубе правило наближеного визначення потенційної швидкості суцільних, нерозірваних КС: максимально можлива швидкість вершини струменя  $v_0$  в 2,34 раза перевищує об'ємну швидкість звуку матеріалу лайнера. Виходячи із цього правила, в роботі проведено ранжування металів за критерієм  $v_0 \sqrt{\rho_j}$  ( $\rho_j$  – щільність матеріалу КС). В результаті цього ранжування перші місця займають відповідно W, Mo, Ni, Cu. Результати пояснюють, наприклад, швидкісні характеристики молібденових і вольфрамових КС, які перевищують характеристики аналогічних легших мідних [28]. Калібри зарядів 73–123 мм; ВР – октол 70/30; лайнер конічної форми; кут при вершині  $2\alpha = 42^\circ$ . Аналізуючи дані для октола 70/30, наведемо основні параметри для Cu, Mo, W: швидкість головної частини КС відповідно –  $V_0 = 8400\text{--}8500$  м/с;  $V_0 = 11250\text{--}11650$  м/с;  $V_0 = 8490\text{--}9330$  м/с; час початку руйнування КС від моменту виходу хвилі детонації на поверхню лайнера (break-up time)  $t_b = 149\text{--}193$  мкс;  $t_b = 87\text{--}122$  мкс;  $t_b = 114\text{--}123$  мкс; відношення  $t_b / D = 1,84\text{--}2,38$ ;  $t_b / D = 1,19\text{--}1,60$ ;  $t_b / D = 1,41\text{--}1,52$ . Перевага мідних КС – більший час до початку руйнування, що збільшує глибину пробиття при малих відстанях від мішені, простота технологій і вартість. Проте виникає питання, якому матеріалу віддати перевагу з точки зору потенційної глибини проникання КС в конденсоване середовище? Для відповіді на це скористаємося теорією, яка, на відміну від гідродинамічної теорії та її модифікацій, враховує основні фізичні ефекти, що впливають на глибину пробиття: швидкість КС, градієнт швидкості вздовж КС, вплив відстані від заряду до мішені і різницю щільності матеріалів КС

і мішені. Для цього скористаємося моделлю, запропонованою Allison і Vitali (модель A–V) [29], і формулами, отриманими Dipersio та Simon, на основі цієї моделі в явному вигляді [30]. Модель A–V розглядає три випадки: (а) проникання до руйнування КС ( $t \geq t_b$ ,  $t_b$  – час до розриву КС ((break up time)); (б) руйнування КС під час проникання в перепону ( $t_0 < t_b \leq t$ ); руйнування КС перед початком проникання в перепону ( $t_b \leq t_0 \leq t$ ). Для перших двох випадків формули для глибини пробиття мають такий вигляд:

$$L = z_0 \left[ \left( \frac{V_0}{V_c} \right)^{\frac{1}{\gamma}} - 1 \right]; \quad (2)$$

$$0 \leq z_0 < V_c t_b \left( \frac{V_c}{V_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}}; \quad (3)$$

$$L = \frac{(1+\gamma)(V_0 t_b)^{\frac{1}{\gamma}} z_0^{\frac{\gamma}{1+\gamma}} - V_c t_b}{\gamma} - Z_0; \quad (4)$$

$$V_c t_b \left( \frac{V_c}{V_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \leq z_0 < V_0 t_b; \quad (5)$$

де  $V_c$  – швидкість елемента КС, за якої припиняється його проникання в перепону;  $\gamma = \sqrt{\rho_t / \rho_j}$ ;  $\rho_t$  – щільність матеріалу мішені;  $\rho_j$  – щільність матеріалу КС. Згідно з гідродинамічною теорією  $L = \frac{1}{\gamma} z_0$  і не залежить від градієнта швидкості вздовж КС. В той же час у багатьох роботах показано, що швидкість елементів зменшується від передніх до хвостових частин КС. Параметр  $t_b$  також змінюється вздовж КС [31]. Для заряду калібром 63 мм з кутом у вершині конуса  $48^\circ 42'$  параметр  $t_b$  змінювався від 120 мкс в головній частині КС до 210 мкс у хвостовій частині, що близько до наведених вище значень із роботи [28].

Розрахунки за формулою (4) проведено для сталі високої міцності з  $V_c=3000$  м/с і  $Z_0=300$  мм. Глибина проникання мідного КС – 530,9 мм, молібденового – 620,1 мм. Тобто, незважаючи на більше значення параметра  $t_b$  для міді, молібденовий КС має перевагу порівняно з мідним. У розрахунках відповідні параметри мали такі значення:  $t_b=150$  мкс (Cu),  $t_b = 90$  мкс (Mo);  $V_0 = 8500$  м/с (Cu),  $V_0 = 11300$  м/с (Mo). Розрахунки за формулою (2) дають такі результати для  $Z_0 = 60$  мм 122 мм (Cu) і 213,1 мм (Mo).

Для порівняння розглянемо відомі експериментальні дані [18]. Швидкість КС при підриванні КЗ з конічним лайнером прогресивної товщини і кутами при вершині  $43^\circ$  і  $45^\circ$  становить 5430 м/с. Розрахунок за формулою (1) для  $z_0 = 50$  мм і 75 мм,  $V_c \approx 2000$  м/с (низьковуглецева сталь) становить відповідно 87 мм і 130,5 мм. Експериментальні дані, отримані нами за методикою, описаною в [18] (рис. 1), для  $z_0 = 50$  мм будуть 92–101 мм. Тобто, є відносно задовільна відповідність між експериментальними і розрахунковими даними, проте є деяке свавілля при виборі параметра  $z_0$ . Ймовірно, що цією величиною в розрахунках має бути так звана фокусна відстань – відстань до мішені, за якої величина пробиття буде максимальна. Зауважимо, що розрахунки за формулою (2) для малих значень відстані між зарядом і мішенню ( $\leq 0,5d_c$ ) дають занижені порівняно з експериментальними даними. Так для промислових зарядів калібром  $d_c = 26$  мм відстань до перепони становила відповідно 10 мм і 20 мм, були отримані численні експериментальні дані у випробуваннях промислових партій на мішенях із сталі Ст.3, які склали 50...55 мм і 72...75 мм відповідно. Вони значно відрізняються від розрахункових (13,2 мм, 26,4 мм). Тобто ця теорія має обмежений діапазон застосування, а саме для повністю сформованих КС і зарядів, розташованих на відстані від мішені  $z_0 \geq (1-2) d_c$ . При цьому для вибору розрахункової формули (2) або (4) необхідно визначати в експериментах величину  $t_b$ . Залежність цієї величини від калібру КЗ не досліджувалась. Із фізичних міркувань і критеріїв теорії подібності часові інтервали мають зменшуватися зі зменшенням калібру. Згідно з [1] швидкості, щільності і тиски в потоках речовин від зарядів різних калібрів будуть однакові за таких умов:  $\sqrt{Qt} / d_c = \text{const}$ ;  $Dt / d_c = \text{const}$ , де  $Q$  – теплота вибуху;  $t$  – час. За геометричної подібності двох зарядів різних калібрів і однакової ВР відношення часових інтервалів визначається відношенням характерних розмірів, в цьому випадку калібрів:  $t_1 / t_2 = d_{c1} / d_{c2}$ . Тому КС при вибуху зарядів малих калібрів руйнується раніше, ніж при вибуху зарядів великих калібрів.

**Матеріали для утворення отворів великого діаметра.** В ряді практичних застосувань, зокрема для проведення гідророзриву в нафтогазових свердловинах, потрібні отвори збільшеного діаметра і максимально глибокі в результаті дії КС, або неглибокі, але розширені в результаті дії УЯ з посиленою дією за перепону. Як правило цей ефект спостерігається при використанні металів з малою щільністю (Al, Ti) [32–34]. Параметри експериментального заряду із роботи [32]: діаметр сферичного лайнера змінної товщини (калібр заряду) – 89 мм, висота заряду – 100 мм; щільність і швидкість детонації ВР (8701 explosive) – 1,69 г/см<sup>3</sup> і 8499 м/с. Швидкість головної частини КС із титанового сплаву одного складу 4320 м/с для другого сплаву 4850 м/с. Збільшений діаметр каналу автори роботи пов'язують з хімічними реакціями Ti з азотом повітря і Ti і Al з залізом в мішені. Аналогічний ефект спостерігався в наших експериментах при взаємодії КС із Al і Cu – Al із сталеву мішенню. Для розв'язання цієї технічної задачі можуть бути використані також композитні метали (псевдосплави із порошків), а також суміші металів і неметалів [33, 34]. Серед останніх одним із найцікавіших композитів є суміші порошкових металів і фторопласту [35, 36]. Тепловий ефект реакцій фторопласту з титаном у порошкових сумішах досягає (4,7 кДж/г) і реалізується при масовому вмісті Ti в суміші 45–50 %. Реакція починається за

температури  $\approx 537$  °С і має вибуховий характер. Для порівняння тепловий ефект реакції  $\text{Cu}+\text{Al}$  для утворення різних алюмінідів міді ( $\text{AlCu}$ ,  $\text{Al}_2\text{Cu}$ ) становить 3,7 кДж/г для стадії розвитку теплового вибуху [36]. Реакція починається за температури 548 °С. Тепловий ефект утворення алюмінідів титану у разі теплового вибуху визначається діапазоном  $\Delta H = 5,9\text{--}9,9$  кДж/г атом (для вмісту  $\text{Al}$  в суміші 25–58 %). Тобто теплові ефекти, які супроводжують хімічні взаємодії металів з фторопластом і металів з алюмінієм, співмірні. Про це зокрема свідчить близькість ефектів, які супроводжують проникання композитних КС  $\text{Cu}+\text{PTFE}$ ,  $\text{Cu}+\text{Al}$  [33].

**Про граничний кут у вершині конічного лайнера.** Загальновідомо, що перевагою високих конічних лайнерів з малими кутами при вершині з кутом  $2\alpha$  є більші швидкості КС, збільшена кінетична енергія і збільшена глибина пробиття [1, 26, 36]. Авторам роботи [26] не вдалося реалізувати режим кумуляції в заряді з кутом при вершині лайнера  $2\alpha = 30^\circ$  напевно через низький рівень технології виготовлення. У той же час у монографії [1] і в роботах [18, 21] наведено експериментальні дані для конічних лайнерів, які показують поступове зростання швидкості КС і глибини пробиття при зменшенні кута у вершині конуса. Максимальну кінетичну енергію мають мідні і алюмінієві з кутами при вершинах  $27^\circ \pm 3^\circ$ . Нагадаємо, що фізична основа існування граничного кута сплескування лайнерів конічної форми та близьких до них форм: швидкість точки контакту має бути меншою за місцеву швидкість звуку. Якщо це правило не виконується, зазвичай при малих кутах сплескування, то КС не утворюється. Для сферичних лайнерів і близьких до них за формою такого обмеження немає, тому що КС формується шляхом вивертання центральної частини лайнера. Тому основним шляхом підвищення ефективності КС зі сферичними лайнерами є збільшення швидкості детонації ВР і форма лайнера, зокрема лайнери дегресивної товщини [9]. Особливий інтерес для практичних застосувань мають визначення закономірностей зміни швидкості КС у разі зміни товщини, форми і матеріалу лайнера, тому що вона (швидкість КС та її градієнт) визначають глибину пробиття перепони і дію КС за перепорою. На рисунку 2 показана залежність швидкості лідируючої частини КС заряду в корпус із сталі (Ст45) з конічним мідним лайнером від кута у вершині. Для побудови кривої  $V_0(2\alpha)$  використано експериментальні і розрахункові дані для швидкості детонації ВР (флегматизований гексоген)  $D = 7800\text{--}8000$  м/с [18, 20–22]. Товщина лайнерів коливалась у межах (1,5...2,5) мм. Точка ініціювання розташована на осі симетрії напроти вершини лайнера. Мідь – монолітна або пориста (пористість не більше 10–11 % у вершині лайнера). Для кутів  $2\alpha \geq 120^\circ$  використані окремі експериментальні дані для лайнерів у вигляді низько сферичних сегментів, які близькі за формою до конічних з великими кутами у вершині.

**Градентні матеріали для лайнерів кумулятивних зарядів.** У [18] досліджено розподіл пористості в матеріалі мідних і композитних ( $\text{W-Cu-Pb}$ ) конічних лайнерів від вершини до основи. Лайнери виготовлені із порошкових матеріалів шляхом холодного пресування. Було показано, що пористість матеріалу при вершині мідного лайнера в  $\approx 2,6\text{--}2,8$  раза менша, ніж при основі (відповідно 10 % і 26...28 %). Для композитного матеріалу ця відмінність менша і становить 1,25...1,3. Враховуючи те, що від пористості матеріалу залежать всі фізико-механічні властивості матеріалу, можна вважати, що ці вироби із матеріалів з градієнтними властивостями. Швидкість звуку при цьому зменшується від вершини лайнера до основи. Враховуючи те, що швидкість струменя зв'язана кореляційною залежністю із швидкістю звуку, для виготовлення вершини КС перевагу мають такі матеріали, як  $\text{Mo}$  і  $\text{W}$ , або їхні суміші (псевдосплави) з іншими металами ( $\text{Cu}$ ,  $\text{Ni}$ ). В [21] методом комп'ютерного моделювання і експериментально досліджено процес сплескування напівсферичних і конічних лайнерів із шарів нікелю та міді. Ця ідея може бути продуктивною для конструювання лайнерів з градієнтними матеріалами з використанням інших металів. Зауважимо, що кількість публікацій, в яких досліджуються матеріали з градієнтними властивостями, досить обмежена [18–19, 21, 36].

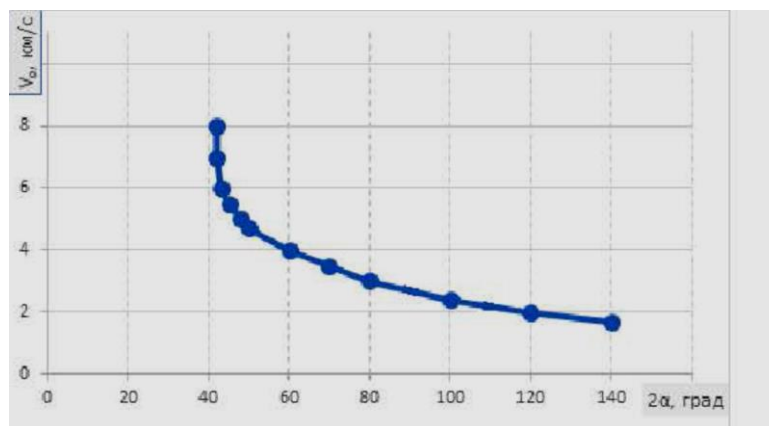


Рис. 2. Залежність швидкості КС для мідного конічного лайнера від кута у його вершині

**Розкриття і руйнування масивного залізобетону, напівскельних і мерзлих порід.** Інколи для оперативного розкриття і утворення отворів у будівельних конструкціях із масивного ( $\geq 1$  м) залізобетону використовують КЗ [37]. Експериментальні дослідження показали, що кумулятивні заряди добре «працюють» у технологіях руйнування масивних залізобетонних конструкцій. Якщо масивні залізобетонні конструкції мають вільні поверхні, або вільні поверхні створюються штучно вибухом, то дія кумулятивних зарядів біля них призводить до інтенсивних руйнувань і передруйнувань залізобетону на всю глибину проникання КС. Для калібру заряду  $\approx 150$  мм ця глибина може становити 1200–1800 мм залежно від кута у вершині мідного або сталевго конічного лайнера. Розрахунок за формулою (2) для чистого бетону (без арматури) для мідного конічного лайнера з кутом у вершині  $55^\circ/60^\circ$   $V_0 = 4000$  м/с і  $V_c = 1500$  м/с для  $z_0 = 200$  мм становить 1,57 м. У [37] описано досвід руйнування масивного залізобетону з густою сіткою арматури товщиною 1...1,2 м кумулятивними зарядами без буріння. Роботи проводилися з метою реконструкції залізобетонних сховищ паливно-мастильних матеріалів на об'єктах Міністерства оборони СРСР. Аналогічним методом можна створювати виробки в напівскельних і мерзлих породах у разі відсутності спеціальної техніки. Для цього вибухами КЗ створюють групу шпурів, які заряджають лінійними зарядами, наприклад, амоніту або іншої ВР. Контури виробки розширюють вибухами додаткових кумулятивних зарядів до потрібних розмірів.

**Про вплив матеріалу лайнера на розмір каналу перфорації.** На сьогоднішній день  $W$  є основною складовою матеріалів лайнерів цивільних зарядів ( $W-Pb$ ,  $W-Pb-Cu$ ,  $Cu-Sn-W-Ni-Al$  та ін.). На рисунку 3 показані мікрофотографії зразків композитних матеріалів лайнерів двох зарядів на основі  $W$ . Вони демонструють більш досконалу структуру матеріалу, показаного на правому рисунку: рівномірність розподілу складових по матеріалу, сфероїдна форма основних компонентів ( $Cu-Sn$ ,  $W$ ,  $Ni$ ). Порівняння цих матеріалів у зарядах одного калібру (25–26 мм) приблизно однакової конструкції показало кращу ефективність роботи заряду з лайнером із матеріалу  $Cu-Sn-W-Ni-Al$ , ніж заряду з лайнером із матеріалу  $Cu-W-Pb$  (глибина пробиття  $\geq$  на 20...25 %), незважаючи на більшу щільність останнього і близькі характеристики ВР: окфол в зарядах вітчизняного виробництва і ВР на основі октогену у зарядах західної компанії.

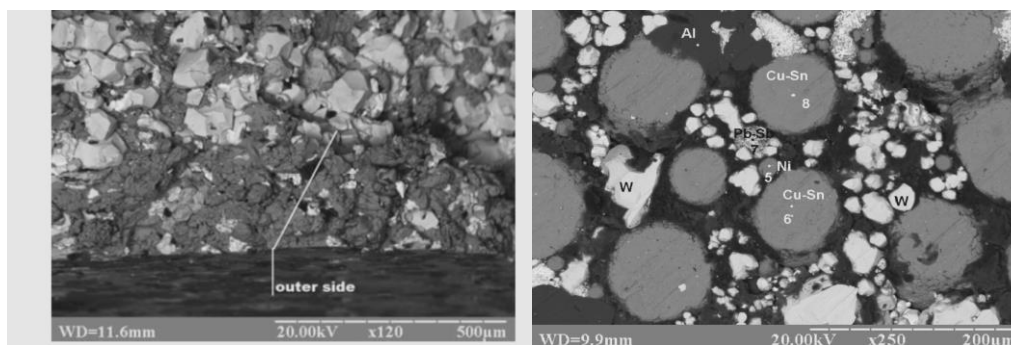


Рис. 3. Розподіл компонентів  $W$ ,  $Pb$  (світлосірий)  $Cu$  (темний) в матеріалі лайнера виробництва НІЦ «Матеріалообробка вибухом» ІЕЗ ім. С.О. Патона (зліва);  $W$ ,  $Pb+Sb$  (світлосірий),  $Ni$ ,  $Cu-Sn$  (темносірий),  $Al$  (темний) у матеріалі лайнера виробництва західної компанії

**Висновки і перспективи подальших досліджень.** Швидкість головної частини КС при вибуху стандартного заряду з конічним лайнером і кутом при вершині  $42^\circ$  лінійно залежить від швидкості детонації ВР у діапазоні 7,5...8,6 км/с, тому із фізичних міркувань така залежність буде справедливою і при менших швидкостях детонації. Інженерна теорія Dipersio та Simon на основі моделі  $A-V$  досить задовільно описує глибину пробиття мішені із сталі Ст3 мідного КС для випадку невеликої відстані між зарядом і мішенню (1...2 калібру). Для малих відстаней ( $\leq 0,5$  калібру) така теорія не застосовується.

Залежність швидкості КС  $V_0(2a)$  за формою близька до показової функції. Очевидно, що існує максимум цієї функції в міру наближення до критичного кута сплескування. Щодо матеріалів лайнерів, то перевагу мають монолітні метали високої чистоти ( $W$ ,  $Mo$ ,  $Cu$ ), а також композити (псевдосплави), виготовлені методами порошкової металургії із порошків  $W$ ,  $Mo$ ,  $Cu$  сфероїдної форми з добавками пластифікаторів ( $Pb$ ), енергетичних добавок ( $Al$ ). Одним із перспективних напрямів досліджень паралельно із вивченням впливу форми і товщини лайнерів є дослідження функціонування зарядів з лайнерами із градієнтних матеріалів, а також дослідження поведінки УЯ із композитного матеріалу у вільному польоті.

Експериментальні дослідження були проведені в межах програм робіт, які фінансувалися Державною геологічною службою України і ДК «Укргазвидобування».

## Список використаної літератури:

1. Walters W.P. Fundamentals of shaped charges / W.P. Walters, J.A. Zukas. – N.Y. : John Wiley and Sons, 1989. – 391 p.
2. Jen-Hsin Ou The Design and Analysis for Shaped Charge Liner Using Taguchi Method / Ou Jen-Hsin, Ou Jen-Bing, Jhu Yan-Jing // International journal of mechanics. – 2014. – Vol. 8. – P. 53–61.
3. Numerical and Experimental Studies of the ŁK Type Shaped Charge / Dariusz Pyka, Adam Kurzawa, Mirosław Vocian and other // Applied Sciences. – 2020. – № 10 (6742). DOI: 10.3390/app10196742.
4. Xian-feng Liang Studies on jet formation and penetration for a double-layer shaped charge / Xian-feng Liang, Qiao Zhang // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2011. – Vol. 47. – P. 241–248.
5. Тимошенко А.Б. Моделирование функционирования боевых частей, содержащих снарядоформирующиеся элементы / А.Б. Тимошенко, И.Б. Чепков // Військово-технічний збірник. – 2011. – № 2 (5). – С. 73–81.
6. The Shooting Tests of Target Perforating Ability, Performed on Cast Concrete Cylinders / Ł.Habera, K.Hebda, P.Koślik, T.Sałaciński // Cent. Eur. J. Energ. Mater. – 2020. – № 17 (4). – P. 584–599.
7. Tamer Elshenawy Experimental and numerical investigation of zirconium jet performance with different liner shapes desing / Tamer Elshenawy, Qing-ming Li, Ahmed Elbeih // Defence technology. – 2022. – Vol. 18, № 1. – P. 12–25.
8. Improvement of the Shaped Charge Jet Penetration Capability by Modifying the Liner Form Using AUTODYN-2D / H.Kemtoughe, S.Savić, S.Terzić and other // Scientific Technical Review. – 2019. – Vol. 69, № 1. – P. 10–15.
9. Войтенко Ю.І. Про основні чинники впливу на глибину пробиття і енергію удару кумулятивних струменів і ударних ядер / 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. 60–63.
10. Study on Penetration Performance of Rear Shaped Charge Warhead / Y.Du, G.He, Y.Liu and other // Materials. – 2021. – № 14 (6526). DOI: 10.3390/ma14216526.
11. Кумулятивний заряд без тротилової вибухової речовини : заявка на корисну модель, № u 2022 03016, дата подання заявки 19.08.2022 р.
12. Спосіб знешкодження мін та боєприпасів кумулятивним зарядом : заявка на корисну модель, № u 2022 03015, дата подання заявки 19.08.2022 р.
13. Хайлов В.Б. Аналіз можливостей застосування малих кумулятивних зарядів для знешкодження боєприпасів / В.Б. Хайлов, В.І. Чеботар, В.В. Борці // Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. – 2020. – Вип. 3 (5). – С. 87–92.
14. Войтенко Ю.І. Сучасні способи розмінування / Ю.І. Войтенко, В.В. Бойко, Вугар Іфрат огли Оруджов // Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво : матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції, 23–25 листопада, 2022. – Шостка, 2022. – С. 45–50.
15. Investigation of Penetration Performance of Zr-based Amorphous Alloy Liner Compared with Copper / Ping Cui, Deshi Wang, Dongmei Shi and other // Materials. – 2020. – № 13 (912). – P. 1–12. DOI: 10.3390/ma13040912.
16. Elshenawy T. Experimental and numerical investigation of zirconium jet performance with different liner shapes desing / T.Elshenawy, Qing-ming Li, Ahmed Elbeih // Defence technology. – 2022. – Vol. 18, № 1. – P. 12–25.
17. Held M. Initiation of explosive a Multiple problem of the Physics of Detonation / M.Held // Explosivstoffe. – 1968. – Vol. 5. – P. 3–11.
18. Drachuk A.G. The Calculation Parameters of Shaped Charges with Porous Liners / A.G. Drachuk, S.V. Goshovskii, Y.I. Voitenko // Ukrainian State Geological Exploration Institute. – Kiev, 2007. – P. 42.
19. Peculiarities of Brittle and Ductile Materials Destruction and Deformation During the Explosion of Industrial Shaped Charges / Y.Voitenko, V.Kravets, A.Shukurov, O.Drachuk // Min. Miner. Deposits. – 2017. – Vol. 11 (2). – P. 12–20.
20. Salkičević Minel Numerical simulations of the formation behavior of explosively formed projectiles / Minel Salkičević // Defense and security studies. – 2022. – Vol. 3. – P. 1–14.
21. Walters W. Introduction to Shaped Charges / W.Walters. – Aberdeen Proving Ground, MD 21005-5069, Army Research Laboratory. ARL-SR-150. – 2007. – 110 p.
22. Li Weibing The effect of annular multi-point initiation on the formation and penetration of an explosively formed penetrator / Weibing Li, Xiaoming Wang, Wenbin Li // International Journal of Impact Engineering. – 2010. – № 37. – P. 414–424.
23. Jun Wu Experimental and numerical study on the flight and penetration properties of explosively formed projectile / Jun Wu, Jingbo Liu, Yixin Du // International journal of impact engineering. – 2007. – Vol. 34. – P. 1147–1162.
24. Гонтар П.А. Енергетичні параметри кумулятивного вибухового ядра під час вибухо-механічного буріння / П.А. Гонтар, О.М. Терентьев, А.Шукюров // Науковий вісник КПІ. – 2016. – № 5. – С. 17–23.
25. Hyssain G. The simulation studies of explosively formed projectiles / G.Hyssain, K.Sanaulbah // J. eng. & apl. Sci. – 2009. – Vol. 28, № 2. – P. 11–21.
26. Establishment of Shaped Charge Optimum Parameters for Small Scale Hydrodynamic Penetration / H.Khairul Kamarudin, Ahmad Mujahid Ahmad Zaidi, Shohaimi Abdullah, Md Fuad Shah Koslan // Modern Applied Science. – 2016. – Vol. 10, № 1. – P. 82–92.
27. Held M. Liners for shaped charges / M.Held // Journal of battlefield technology. – 2001. – Vol 4, № 3. – P. 1–6.
28. Pham J.D. Shaped charge jet flash radiograph digitization / J.D. Pham, E.L. Baker, S. De Fisher // Technical Report ARAET-TR-05013. – Picatinny, New Jersey, 2005: U.S. army armament research, development and engineering center. – 39 p.
29. Elshenawy T. Influence of target strength on the penetration depth of shaped charge jets into RHA targets / T.Elshenawy, Ahmed Elbeih, Li Q.M. // International Journal of Mechanical Sciences. – 2018. – Vol. 136. – P. 234–242.



30. Simon J. Penetration of Shaped-Charge Jets into Metallic Targets / *J.Simon, R.Dipersio, A.B. Merendino*. – Ballistic Research Laboratory Memorandum, Report № 1296. – 1965.
31. Petit J. Break-up of Cooper shaped-charge jets: Experiment, numerical simulations, and analytical modelling / *J.Petit, V.Jeanclaude, C.Fressengeas* // *J. Appl. Phys.* – 2005. – № 98. – 123521. DOI: 10.1063/1.2141647.
32. Penetration and Cratering of Steel Target by Jets from Titanium Alloy Shaped Charge Liners / *Dacheng Gao, Wenbin Li, Wenjin Yao and other* // *Materials*. – 2022. – № 15. DOI: 10.3390/ma15145000.
33. Voitenko Y.I. Influence of the Striker Material on the Results of High-Speed Impact at a Barrier / *Y.I. Voitenko, R.V. Zakusylo, S.Zaytchenko* // *Cent. Eur. J. Energ. Mater.* – 2021. – № 18 (3). – P. 405–423.
34. Ефективність зарядів різних конструкцій при деформуванні та руйнуванні металевих перепон / *Ю.І. Войтенко, В.Г. Кравець, А.Шукюров та ін.* // *Вісник ЖДТУ*. – 2018. – № 1 (81). – С. 223–231. DOI: 10.26642/tn-2018-1(81)-223-231.
35. Investigation on the Thermal Behavior, Mechanical Properties and Reaction Characteristics of Al-PTFE Composites Enhanced by Ni Particle / *J.Wu, H.Wang, X.Fang and other* // *Materials*. – 2018. – № 11 (9). – 1741.
36. New Functional Materials in Mechanical Engineering and Geology / *Y.I. Voitenko, R.V. Zakusylo, A.T. Wojewodka and other* // *Cent. Eur. J. Energ. Mater.* – 2019. – № 16 (1). – P. 135–149.
37. *Войтенко Ю.І. Фізико-технічні основи свердловинних геотехнологій з керованим тріщиноутворенням* : дис. ... д.т.н. : 05.15.11 / *Ю.І. Войтенко*. – Київ, 2000. – 377 с.

#### References:

1. Walters, W.P. and Zukas, J.A. (1989), *Fundamentals of shaped charges*, John Wiley and Sons, N.Y., 391 p.
2. Jen-Hsin Ou, Ou Jen-Bing and Jhu Yan-Jing (2014), «The Design and Analysis for Shaped Charge Liner Using Taguchi Method», *International journal of mechanics*, Vol. 8, pp. 53–61.
3. Pyka, Dariusz, Kurzawa, Adam, Bocian, Mirosław et al. (2020), «Numerical and Experimental Studies of the ŁK Type Shaped Charge», *Applied Sciences*, No. 10 (6742), doi: 10.3390/app10196742.
4. Xian-feng, Liang and Zhang, Qiao (2011), «Studies on jet formation and penetration for a double-layer shaped charge», *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, Vol. 47, pp. 241–248.
5. Timoshenko, A.B. and Chepkov, I.B. (2011), «Modelirovanie funktsionirovaniya boevykh chastei, sodержashchikh snaryadoformiruyushchiesya elementy», *Viiskovo-tekhnichnyi zbirnyk*, No. 2 (5), pp. 73–81.
6. 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.*, No. 17 (4), pp. 584–599.
7. Elshenawy, Tamer, Li, Qing-ming and Elbeih, Ahmed (2022), «Experimental and numerical investigation of zirconium jet performance with different liner shapes desing», *Defence technology*, Vol. 18, No. 1, pp. 12–25.
8. Kemmoukhe, H., Savić, S., Terzić, S. et al. (2019), «Improvement of the Shaped Charge Jet Penetration Capability by Modifying the Liner Form Using AUTODYN-2D», *Scientific Technical Review*, Vol. 69, No. 1, pp. 10–15.
9. Voitenko, Yu.I., Hoshovskyi, S.V. and Zakusylo, R.V. (2022), «Pro osnovni chynnyky vplyvu na hlybynu probyttia i enerhiu udaru kumuliatyvnykh strumeniv i udamykh yader», *Khimichna tekhnolohiia: nauka, ekonomika ta vyrobnytstvo*, materialy VI Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, 23–25 lystopada, Shostka, pp. 60–63.
10. Du, Y., He, G., Liu, Y. et al. (2021), «Study on Penetration Performance of Rear Shaped Charge Warhead», *Materials*, No. 14 (6526), doi: 10.3390/ma14216526.
11. *Kumuliatyvnyi zariad bez trotylovoi vybukhovoi rechovyny* (2022), zaiavka na korysnu model, No. u 2022 03016, data podannia zaiavky 19.08.
12. *Sposib zneshkodzhennia min ta boieprypasiv kumuliatyvnym zariadom* (2022), zaiavka na korysnu model, No. u 2022 03015, data podannia zaiavky 19.08.
13. Khailov, V.B., Chebotar, V.I. and Borshch, V.V. (2020), «Analiz mozhlyvostei zastosuvannia malykh kumuliatyvnykh zariadiv dlia zneshkodzhennia boieprypasiv», *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho naukovo-doslidnoho instytutu vyprovuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki*, Issue 3 (5), pp. 87–92.
14. Voitenko, Yu.I., Boiko, V.V. and Orudzhov, Vuhar Ifrat ohly (2022), «Suchasni sposoby rozminuvannia», *Khimichna tekhnolohiia: nauka, ekonomika ta vyrobnytstvo*, materialy VI Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, 23–25 lystopada, Shostka, pp. 45–50.
15. Cui, Ping, Wang, Deshi, Shi, Dongmei et al. (2020), «Investigation of Penetration Performance of Zr-based Amorphous Alloy Liner Compared with Copper», *Materials*, No. 13 (912), pp. 1–12, doi: 10.3390/ma13040912.
16. Elshenawy, T., Li, Qing-ming and Elbeih, Ahmed (2022), «Experimental and numerical investigation of zirconium jet performance with different liner shapes desing», *Defence technology*, Vol. 18, No. 1, pp. 12–25.
17. Held, M. (1968), «Initiation of explosive a Multiple problem of the Physics of Detonation», *Explosivstoffe*, Vol. 5, pp. 3–11.
18. Drachuk, A.G., Goshovskii, S.V. and Voitenko, Y.I. (2007), «The Calculation Parameters of Shaped Charges with Porous Liners», *Ukrainian State Geological Exploration Institute*, Kiev, pp. 42.
19. Voitenko, Y., 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 (2), pp. 12–20.
20. Salkičević, Minel (2022), «Numerical simulations of the formation behavior of explosively formed projectiles», *Defense and security studies*, Vol. 3, pp. 1–14.
21. Walters, W. (2007), *Introduction to Shaped Charges*, Aberdeen Proving Ground, MD 21005-5069, Army Research Laboratory. ARL-SR-150, 110 p.

22. Li, Weibing, Wang, Xiaoming and Li, Wenbin (2010), «The effect of annular multi-point initiation on the formation and penetration of an explosively formed penetrator», *International Journal of Impact Engineering*, No. 37, pp. 414–424.
23. Jun, Wu, Liu, Jngbo and Du, Yixin (2007), «Experimental and numerical study on the flight and penetration properties of explosively formed projectile», *International journal of impact engineering*, Vol. 34, pp. 1147–1162.
24. Hontar, P.A., Terentiev, O.M. and Shukiurov, A. (2016), «Enerhetychni parametry kumuliatyvnoho vybukhovoho yadra pid chas vybukho-mekhanichnoho burinnia», *Naukovyi visnyk KPI*, No. 5, pp. 17–23.
25. Hyssain, G. and Sanaulbah, K. (2009), «The simulation studies of explosively formed projectiles», *J. eng. & appl. Sci.*, Vol. 28, No. 2, pp. 11–21.
26. Khairul Kamarudin, H., Ahmad Mujahid Ahmad Zaidi, Shohaimi Abdullah and Md Fuad Shah Koslan (2016), «Establishment of Shaped Charge Optimum Parameters for Small Scale Hydrodynamic Penetration», *Modern Applied Science*, Vol. 10, No. 1, pp. 82–92.
27. Held, M. (2001), «Liners for shaped charges», *Journal of battlefield technology*, Vol 4, No. 3, pp. 1–6.
28. Pham, J.D., Baker, E.L. and De Fisher, S. (2005), «Shaped charge jet flash radiograph digitization», *Technical Report ARAET-TR-05013*, 2005: U.S. army armament research, development and engineering center, Picatinny, New Jersey, 39 p.
29. Elshenawy, T., Elbeih, Ahmed and Li, Q.M. (2018), «Influence of target strength on the penetration depth of shaped charge jets into RHA targets», *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 136, pp. 234–242.
30. Simon, J., Dipersio, R. and Merendino, A.B. (1965), «Penetration of Shaped-Charge Jets into Metallic Targets», *Ballistic Research Laboratory Memorandum, Report No. 1296*.
31. Petit, J., Jeanclaude, V. and Fressengeas, C. (2005), «Break-up of Cooper shaped-charge jets: Experiment, numerical simulations, and analytical modelling», *J. Appl. Phys.*, No. 98, 123521, doi: 10.1063/1.2141647.
32. Dacheng, Gao, Li, Wenbin, Yao, Wenjin et al. (2022), «Penetration and Cratering of Steel Target by Jets from Titanium Alloy Shaped Charge Liners», *Materials*, No. 15, doi: 10.3390/ma15145000.
33. Voitenko, Y.I. Zakusylo, R.V. and Zaytchenko, S. (2021), «Influence of the Striker Material on the Results of High-Speed Impact at a Barrier», *Cent. Eur. J. Energ. Mater.*, No. 18 (3), pp. 405–423.
34. Voitenko, Yu.I., Kravets, V.H., Shukiurov, A. et al. (2018), «Efektyvni zariadi riznykh konstruktzii pry deformuvanni ta ruinuванні metalevykh perepon», *Visnyk ZhDTU*, No. 1 (81), pp. 223–231, doi: 10.26642/tn-2018-1(81)-223-231.
35. Wu, J., Wang, H., Fang, X. et al. (2018), «Investigation on the Thermal Behavior, Mechanical Properties and Reaction Characteristics of Al-PTFE Composites Enhanced by Ni Particle», *Materials*, No. 11 (9), 1741.
36. Voitenko, Y.I., Zakusylo, R.V., Wojewodka A.T. et al. (2019), «New Functional Materials in Mechanical Engineering and Geology», *Cent. Eur. J. Energ. Mater.*, No. 16 (1), pp. 135–149.
37. Voitenko, Yu.I. (2000), *Fizyko-tekhnichni osnovy sverdlovnykh heotekhnologii z kerovanym trishchyuoutvorennyam*, D.Sc. Thesis of dissertation, 05.15.11, Kyiv, 377 p.

**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.

**Костюк** Олександр Олексійович – головний спеціаліст, секція прикладних проблем НАН України.

Наукові інтереси:

- спеціальні вибухові роботи.

E-mail: ALKOST@meta.ua.

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

Наукові інтереси:

- сейсмічна безпека техногенних вибухів.

E-mail: passichnyk@gmail.com.

**Voitenko Yu.I., Goshovskii S.V., Kostiuk O.O., Pasichnyk A.M.**

**On optimum designs and materials of shaped charges for practical applications**

**Purpose.** Review and analysis of the studies results of the functioning the cumulative charges with different liners for forecasting, or obtaining correlation dependencies such as «detonation velocity of explosives – velocity of elements of shaped charge jets (SCJ)», «angle at the top of a conical liner – velocity of SCJ»; evaluation and experimental verification of engineering theories of CJ penetration into dense materials for projecting charges in practical applications; analysis of the effectiveness of shaped charge (SC) with liners made of different materials.

**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, analytical, graph-analytical methods and physical and mathematical modeling were used in the work.

**Findings.** Quantitative relationships between the velocity of the main part of the CSJ and the detonation velocity of the explosive in the charge with an angle at the top of the conical liner of  $42^\circ$  and the dependence of the speed of the main part of the CJ on the angle at the top of the conical copper liner was revealed. Engineering theories of CSJ penetration into dense barriers was analyzed. It is shown that the best results, which are close to the experimental data, are predicted by the theory based on the A–V model (Allison and Vitali). The most promising materials for liners of cumulative charges with the aim of increasing the penetration depth or increasing the diameter during shallow penetration have been determined. Some practical applications of short-circuiting was considered, in particular, the disposal and utilization of ammunition and non-traditional methods of destruction of reinforced concrete and rocks.

**Originality.** A linear dependence of the CSJ velocity on the explosive velocity detonation for a charge with a conical liner and an angle at the top of  $42^\circ$  was established, as well as a dependence of the CSJ velocity on the angle at the top of a conical copper liner, which is close to a power law.

**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 utilization of ammunition, for the opening of oil and gas reservoirs, for the reconstruction of construction facilities, in military affairs.

**Keywords:** shaped charge; liner; detonation; shaped charge jet; explosively formed penetrator; penetration.

Стаття надійшла до редакції 20.04.2023.