

УДК 623.451.4.082.5:623.56

СУЧАСНІ КУМУЛЯТИВНІ ЗАРЯДИ ТА ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЇХНЬОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

Ю. І. Войтенко¹, В. В. Бойко^{1†}, О. О. Костюк²,
Ю. М. Сидоренко^{3‡}, С. В. Гошовський⁴

¹Інститут гідромеханіки НАН України
вул. Марії Капніст, 8/4, 03057, Київ, Україна
†E-mail: seismic-control@ukr.net

²Секція прикладних проблем НАН України
вул. Володимирська, 54, 01030, Київ, Україна

³Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
пр. Перемоги, 37, 03056, Київ, Україна
‡E-mail: yura_michael@ukr.net

⁴Державна установа «Науковий гідрофізичний центр НАН України»
пр. Глушкова, 42, 03187, Київ, Україна

Отримано 11.06.2022

Виконано аналіз відомих теоретичних і експериментальних досліджень функціонування кумулятивних зарядів з лайнерами різної форми з різних матеріалів для вибору шляхів удосконалення виробів і отримання кумулятивних струменів і ударних ядер з більшою кінетичною енергією, ніж для традиційних форм (конус і сфера). Виділені основні й другорядні чинники, які впливають на кінетичну енергію кумулятивних струменів і ударних ядер і глибину пробиття щільних перепон, а саме: енергетичні характеристики вибухових матеріалів (швидкість детонації та енергія вибуху), форма, товщина й матеріал лайнера, схема збудження детонації, наявність корпусу заряду, а також початкова температура лайнера. Проаналізовано вплив матеріалу лайнера та технології його виготовлення та обробки на глибину пробиття і об'єм каверни. Окремо розглянуто монолітні, пористі та композитні пористі матеріали й найбільш перспективні з них для збільшення глибини пробиття і об'єму. Відзначено значний вплив структури і хімічного складу матеріалу лайнера на результат роботи кумулятивного заряду, зокрема, розміру й форми зерна в монолітних металах, розміру форми зерен в порошкових монометалічних і композитних матеріалах. Обґрунтовані діапазони основних конструкційних параметрів лайнерів кумулятивних зарядів конічної та близьких до неї форм, які забезпечують максимальну глибину пробиття перепони: кутів при вершині, товщин, а також вплив постійності, або змінності товщини лайнера на параметри кумулятивного струменя у вільному польоті і глибину проникання в перепону. Розглянуто способи

формування кумулятивним вибухом безградієнтних, або малоградієнтних компактних елементів, які мають більшу кінетичну енергію, ніж традиційні ударні ядра. Одержано подальший розвиток уявлень про шляхи перспективних досліджень з метою розробки конструкцій кумулятивних зарядів і матеріалів облицювань для збільшення пробивної здатності кумулятивних струменів, компактних елементів і ударних ядер.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: кумулятивний заряд, детонація, лайнер, кумулятивний струмінь, ударне ядро

1. ВСТУП

Кумулятивні заряди (КЗ) є виробами подвійного призначення і використовуються в цивільній промисловості (переважно геологічна розвідка і видобування нафти і газу) і військовій справі.

Відомо, що кумулятивна дія вибухової речовини (ВР) здійснюється за допомогою виїмки, зробленої в основі заряду ВР [1]. Якісним стрибком, що зумовило широке застосування кумулятивного ефекту, з'явилося використання металевого кумулятивного облицювання виїмки. В країнах західної Європи пріоритет відкриття дослідження зарядів ВР з виїмками пов'язують з ім'ям Макса фон Фьорстера (1883 р.) [1]. У США пріоритет досліджень зарядів ВР із виїмкою належить професору Чарльзу Монро (1888 р.), в Німеччині – професору Е. Нейману [1]. Практично одночасно були розроблені основні положення теорії кумулятивних зарядів з металевим облицюванням та опубліковані Біркгофом (1948 р.) [2] і М. А. Лаврентьевим (1957 р.) [3] для стаціонарного випадку з використанням моделі рідини, що не стискається. Основне припущення теорії – це подання матеріалу кумулятивної облицювання у вигляді ідеальної нестисливої рідини. Гідродинамічна теорія, як теорія першого наближення для ефекту кумуляції отримала досить широке експериментальне підтвердження для певного діапазону швидкостей удару кумулятивних струменів (КС). Основний результат цієї теорії – глибина пробиття пропорційна довжині струменя і кореню квадратному із щільності матеріалу струменя і не залежить від швидкості удару по мішені. Відхилення від цієї теорії спостерігаються для малих швидкостей удару (до 4000 м/с). Врахування стисливості рідини показує, що поправки на кінетичні характеристики процесу утворення струменя і проникання перевищують відповідні характеристики в моделі ідеальної нестисливої рідини не більше, ніж на (10...16) % [4]. Особливе значення для фізики кумуляції і проникання КС і компактних елементів в перепони мають матеріалознавчі аспекти даної групи задач. Експерименти показують, що структура матеріалу облицювань – лайнерів кумулятивних зарядів суттєво впливає на параметри руху КС у вільному польоті, на глибину проникання і на об'єм каверни в перепоні. При цьому спостерігаються результати, які протирічать гідродинамічній теорії: КС із пористих металів (Cu, Al), які мають меншу щільність, ніж монолітні метали пробивають отвори більшої глибини і створюють каверни більшого об'єму [5].

Численні приклади відхилень від цієї теорії показали, що фізика утворення КС і їх проникання в перепони набагато складніша, ніж в гідродинамічній моделі. З'явилися моделі, які враховували стисливість, в'язкість, пластичність матеріалів облицювань і перепон [6–8]. Фундаментальний огляд цих моделей викладено в роботі [6]. Побіжний

огляд літературних джерел показує, що основними чинниками, які впливають на ефективність кумулятивних зарядів є швидкість детонації ВР, конструкція заряду (схема збудження детонації, відсутність, чи наявність корпусу), форма і товщина лайнера, матеріал і початкова температура лайнера, наявність потужних фізичних полів в момент формування і польоту КС [4–23].

Мета цієї роботи – аналіз впливу основних конструкційних і технологічних чинників на глибину пробиття і об'єм каверни для визначення найбільш перспективних напрямків досліджень з метою вдосконалення зарядів.

2. ТИПИ ЛАЙНЕРІВ І ЇХНІ ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Впливу форми лайнера кумулятивного заряду на глибину бронепробиття присвячено численні статті та монографії [9–14]. Класичними формами лайнерів, які традиційно використовуються в КЗ є конус і сфера (Рис. 1, 2). При використанні конічних лайнерів з гострими кутами реалізується класичний механізм кумуляції з утворенням високошвидкісного градієнтного кумулятивного струменя, головна частина якого рухається із швидкостями (5...10) км/с, а хвостові елементи – зі швидкостями (2...3) км/с і глибиною пробиття сталеві мішені від 5 до 10 калібрів заряду (калібр заряду d_c приблизно дорівнює діаметру основи лайнера. Позаду КС рухається масивна частина матеріалу лайнера, яка має назву пест [1]. В КС переходить порядку (10...20) % маси лайнера, в пест – інша частина маси лайнера. При сплескуванні лайнера у формі сфери швидкість КС приблизно вдвічі менша, ніж швидкість головної частини КС від конічного лайнера, але маса його в три-чотири рази більша, тому загальна енергія КС від напівсферичного облицювання співрозмірна з енергією КС від конуса такої ж маси.

При використанні лайнерів у вигляді сферичних сегментів і конусів з тупими кутами $2\alpha \approx (150...180)^\circ$ реалізується режим так званої оберненої кумуляції, пов'язаний з механізмом вивертання кумулятивного облицювання і формуванням компактних елементів з практично стовідсотковим виходом матеріалу облицювання в ударне ядро (УЯ), швидкістю порядку (2...3) км/с і пробиттям сталеві перепони товщиною $(0.5...0.8)d_c$, Рис. 1. Існує ще один режим кумуляції, який автори роботи [1] назвали гіперкумуляцією. Для його реалізації необхідно, щоб лайнер, показаний на Рис. 1а був повернутий на 180° , сплескування матеріалу лайнера відбувалося під кутами більшими 180° , а детонація розповсюджувалася зліва направо (Рис. 1б). На нашу думку, дана ідея вимагає ретельної перевірки і порівняння результатів з кращими зразками зарядів, в яких використовується класичний механізм кумуляції, коли матеріал лайнера сплескується під кутами меншими 180° (Рис. 1в).

Протягом останніх років збільшився потік робіт, присвячених впливу форми лайнера на параметри формування КС і КЕ у вільному польоті і на глибину пробиття [9–14].

Показовими в цьому сенсі є роботи [9, 10], в яких експериментально і теоретично досліджено вплив форм лайнерів, які відрізняються від класичних конічних і сферичних лайнерів. В роботі [10] одна з таких форм названа авторами еліптичною (Рис. 2а), а в роботі [9] близька до неї форма названа біконічною (Рис. 2б, №4).

В обох роботах показано, що застосування лайнерів такої форми дозволяє збільшити глибину проникання мідних КС відповідно в бетон і сталь-бетон – на (25...40) % [9], цирконієвих КС із лайнерів з розтрубом – на 10.3 % (Рис. 2б, №3), з біконічних лайне-

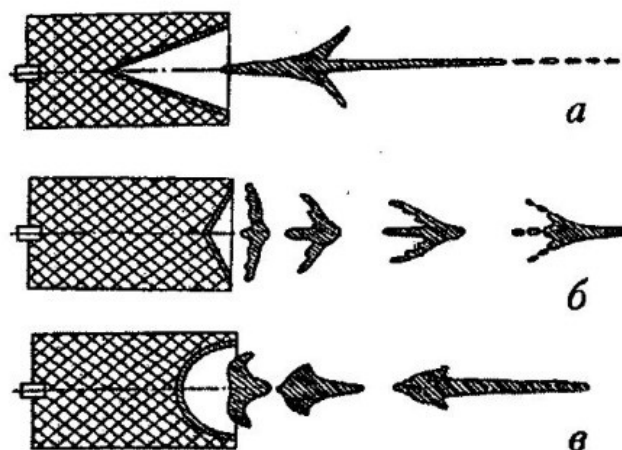


Рис. 1. Різні режими кумуляції:
а — класична, б — «обернена», в — проміжний режим

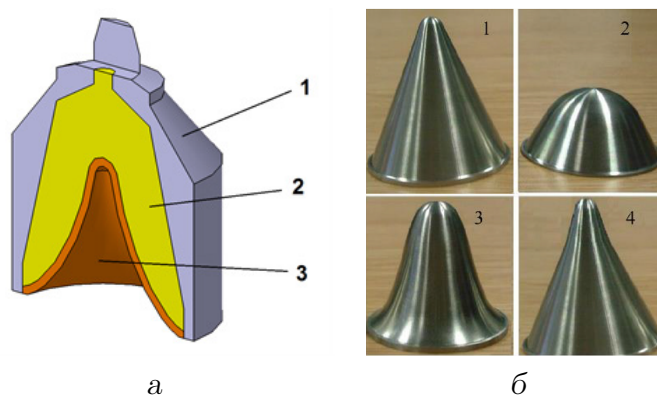


Рис. 2. Нетрадиційні форми лайнерів, досліджених в роботах [9, 10]:
1 — корпус, 2 — ВР, 3 — лайнер

рів – на 22 % в комбінованій перепоні «сталь А-36–вода–сталь А-36–бетон» [10].

Характеристики вибухових матеріалів і матеріалів лайнерів наступні: в роботі [9] флегматизований гексоген щільністю 1600 кг/м^3 ; швидкість детонації 8200 м/с ; мідь щільністю 8900 кг/м^3 (моноліт) і 8400 кг/м^3 (пориста з порошку; відносна пористість – 1.06; абсолютна пористість – 5.6 %); в роботі [10] вибухівка РЕ4 на основі гексогену (88 % гексоген і 12 % пластифікатор та інші добавки. Швидкість детонації РЕ4 8027 м/с при щільності 1600 кг/м^3 . В роботі [10] досліджено лайнери чотирьох форм із цирконію високої чистоти. Найбільшу глибину пробиття на бетонних мішенях показали заряди з лайнерами №4 (Рис. 2б).

Ефективність лайнерів криволінійної форми з поступовим збільшенням кута від вершини до основи і поступовим збільшенням товщини лайнера від вершини до основи досліджували автори роботи [11]. В порівнянні з конічним лайнером лайнери з криволінійними поверхнями дозволяють збільшити швидкість КС, а при певному значенні кривизни поверхні також збільшити глибину пробивання. Збільшення товщини лайне-

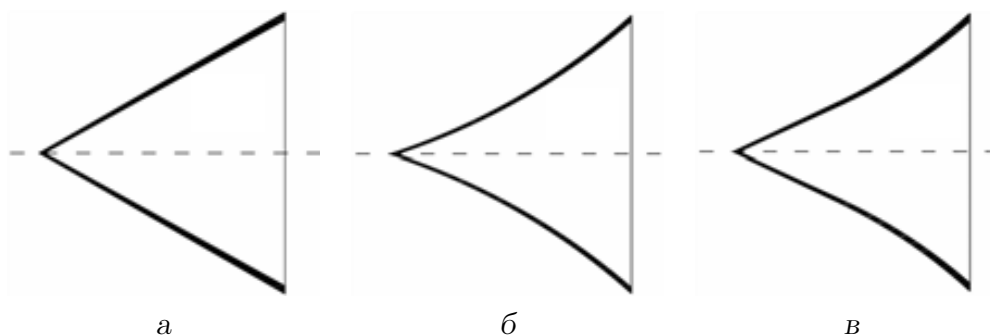


Рис. 3. Форми лайнерів, досліджених в роботі [11]:
а — конічна, б — зі сферичними обвідними, в — у формі розтрубу

рів від вершини до основи для всіх досліджуваних в роботі форм (конус і два варіанти лайнерів з криволінійними поверхнями, Рис. 3) показало збільшення швидкості і глибини пробивання мішені із сталі РНА. При цьому найменший результат по глибині пробиття показав конічний лайнер постійної товщини (225 мм), а найбільший - лайнер з меншим кутом при вершині і криволінійною поверхнею (255 мм). Причини, якими можна пояснити збільшення пробиття перепони при таких змінах форми, такі:

- поступове збільшення коефіцієнтів навантаження і мас елементів лайнера від вершини до основи;
- хвильовий механізм збільшення швидкості сплескування лайнера ударними хвилями, утвореними хвилею детонації при відбитті від корпусу при його наявності;
- максимально можлива швидкість головної частини КС за рахунок наближення кута у вершині лайнера близького до критичного значення за критерієм струменеутворення.

Так в роботі [10] точно розраховано значення критичного кута при вершині лайнера за критерієм утворення струменя і геометрія конічного лайнера при вершині наближена до цього значення. В роботі [9] кут лайнера при вершині зменщується безперервно і експериментально визначена така його конфігурація, яка забезпечує максимальну глибину пробиття.

3. ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ЛАЙНЕРА НА КІНЕТИЧНУ ЕНЕРГІЮ КОМПАКТНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

3.1. Форма лайнера

Ряд робіт присвячено дослідженням зарядів з лайнерами сферичної геометрії і комбінованих лайнерів «півсфера–циліндр» [12–14]. Така конструкція КЗ дозволяє розігнати головну частину КС, яка утворюється при сплескуванні напівсферичного лайнера дегресивної товщини (зменшення товщини від вершини до основи) до швидкостей співрозмірних з КС від конічних лайнерів). Основний результат даних досліджень – режими і параметри струменевих течій при сплескуванні півсферичних лайнерів дегресивної

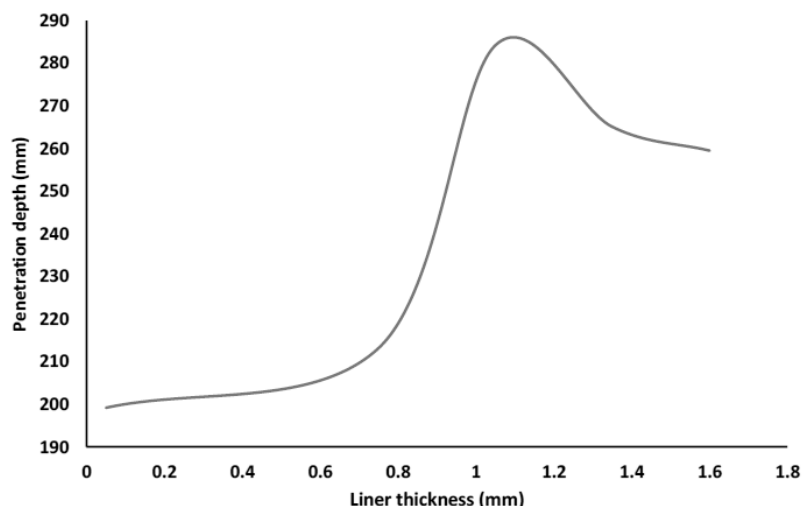


Рис. 4. Зміна глибини проникання струменя від товщини лайнера [16]

товщини. КС від таких лайнерів рухаються із швидкостями, які досягають параметрів руху КС від конічних лайнерів.

Ударні ядра, які утворюються при сплескуванні низько сферичних лайнерів, або конічних з кутами при вершині порядку $(150 \dots 180)^\circ$ (Рис. 1б) мають кінетичну енергію, яка обмежена швидкістю руху $(2 \dots 3)$ км/с і масою лайнера. Збільшити цю енергію можна лише збільшенням швидкості УЯ шляхом зміни схеми збудження детонації із точкової на кільцеву [22, 23]. Проте існує ще один шлях збільшення кінетичної енергії компактних елементів (КЕ). Це використання комбінованих лайнерів «півсфера–циліндр» [13, 14]. Центральна частина такого лайнера розганяється до швидкості 6 км/с і вище, а задня градієнтна частина КС відсікається при схлопуванні циліндричної частини лайнера. Кількісні оцінки показують, що у розі маси КЕ $(0.2 \dots 0.3)m_l$ (m_l – маса лайнера) і швидкості 6 км/с кінетична енергія збільшується в два-три рази в порівнянні з кінетичною енергією УЯ, який рухається із швидкістю 2 км/с.

3.2. Товщина лайнера

Результати експериментальних досліджень, отримані різними авторами, показують, що для кожного калібру заряду існує залежність глибини проникання КС від товщини лайнера. Форма цієї залежності близька до параболічної з екстремумом для деякої товщини облицювання кумулятивного заряду δ^* , при якій глибина пробиття максимальна (Рис. 4). Існування такої залежності пов'язано з оптимальним відбором енергії вибуху КС (маси і швидкості руху) для певного діапазону товщин. Вид кривої залежить, напевно, від конструкції КЗ: наявність, або відсутність корпусу, інертних лінз, тощо.

Калібр заряду в роботі [15] – 26 мм, в роботі [16] – 33 мм. Вибухова речовина в заряді з роботи [15] – гексоген флегматизований (ГФ) (пресований), в заряді з роботи [16] – РЕТН (литий) з добавками (стабілізаторами). Швидкість детонації ГФ – $(7800 \dots 8100)$ м/с, РЕТН – 6970 м/с.

Вид залежностей $L(\delta)$ з роботи [16] і дані, взяті з роботи [15], для заряду калібром 26 мм (Табл. 1, верхні – Cu, нижні – Pb-W) показують, що середні значення δ^* для обох

Табл. 1. Залежність глибини пробиття сталеві мішені Ст. 45 від товщини мідного і композитного лайнерів

δ , мм	0.9/1.4	1/1.6	1.6/2.2	1.8/2.5
L , мм	95.0	98.0	97.0	93.0
δ , мм	0.9/1.4	1/1.6	1.3/2.1	1.5/2.2
L , мм	110.0	115.0	107.0	99.0

зарядів і матеріалів порошкової металургії [15] та рафінованої електролітичної міді [16] досить близькі і складають (11...13) мм. Скрізь у таблиці через ризику подано товщину лайнера біля вершини та біля основи.

3.3. Матеріал лайнера

Для аналізу впливу матеріалу лайнера на глибину проникання кумулятивного струменя (КС) в металічні і неметалічні матеріали необхідно розрізнити дві групи матеріалів і основні фізичні процеси, які супроводжують формування КС і їх проникання в перепону:

- монолітні метали;
- пористі монометалічні матеріали і пористі композитні матеріали з використанням методів порошкової металургії.

В першому випадку відмічається залежність між здатністю металу до швидкого обтиснення і типом кристалічної решітки. Важкі пластичні метали групи міді і деякі сплави утворюють суцільні струмені, щільність яких не більше, ніж на 10 % нижча щільності матеріалу лайнера і деякі, при великому видовженні (приблизно в 10 разів у порівнянні з вихідною довжиною твірного облицювання) не розриваються і зберігають високу щільність [17, 18]. Інші метали, наприклад, залізо та цинк спочатку утворюють суцільні струмені, які, на відміну від попередніх, розриваються значно раніше [18, 19]. Крихкі метали, зокрема W, Ti і, особливо з домішками неметалів, метали та композити з високою пористістю з порошків взагалі не утворюють суцільних або утворюють на короткий період часу струменів. Вони утворюють дискретні струмені, які складаються з окремих твердих частин і конгломератів (кластерів) скупчень цих частин [17]. Незважаючи на це, у разі дотримання технологічного регламенту, точності виготовлення заряду і лайнера пробиття сталеві мішені ($H_B = 239$) зарядом калібром 100 мм досягало 800 мм і вище при відстані до мішені (500...750) мм. Крайній результат – (10...11) калібрів був отриманий при відстані до мішені (7.5...10) калібрів і товщині лайнера 1.5 мм. Лайнер був виготовлений із псевдосплаву W-Cu щільністю 14.8 г/см³; ВР – РВХ (95 % НМХ – октоген). Ці результати говорять на доцільність застосування важких сплавів і псевдосплавів, які отримують методами порошкової металургії з використанням порошків в мікродіпазоні і, можливо, наноматеріалів.

Лайнери з твердих розчинів можуть утворювати когерентні, не розірвані КС, але не настільки пластичні, як їх чисті металеві складові [19]. Згідно даним роботи [20] сплави Ag-Cu і Ni-Cu показували гірші результати, ніж лайнери із електролітичної безкисневої

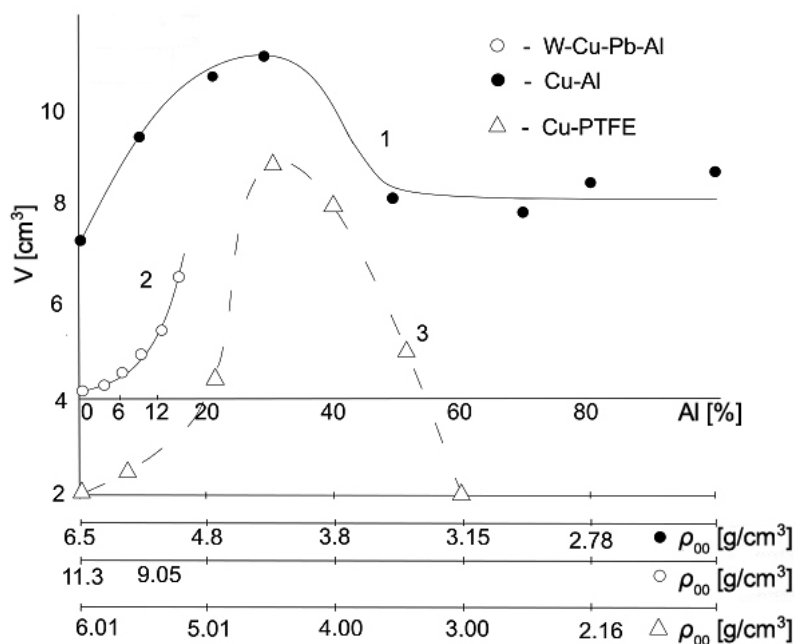
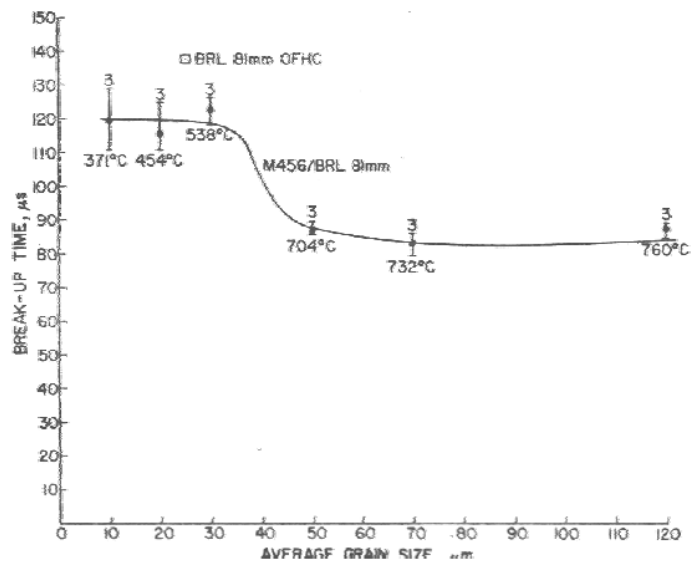


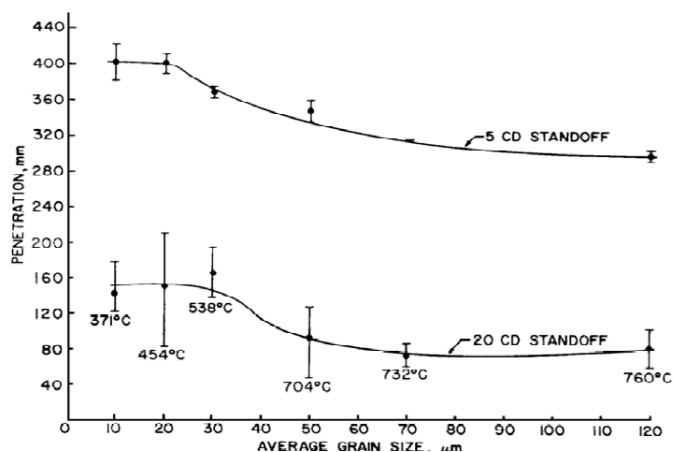
Рис. 5. Залежність об'єму кратера в мішені зі сталі СтЗ-(АМЦн) від вмісту Al в Cu-Al (крива 1 і ●); у композиті W-Cu-Pb-Al (крива 2 і ○); і в мішені зі сталі С45 від вмісту Cu в композиті PTFE+Cu (крива 3 і △)

міді. При виборі матеріалу лайнера має значення поздовжня і об'ємна швидкість звуку C , тому що одним із критеріїв утворення КС є умова $V_k < C$ (V_k – швидкість точки контакту на осі заряду). Швидкість точки контакту залежить від швидкості детонації і кута при вершині лайнера. В цій роботі із дев'яти металів: Al, Cu, Au, Mo, Ag, Ta, W, U, Zr за параметрами швидкість звуку, щільність і пластичність металу рекомендовано Al, Cu, W, Zr. При цьому Zr використовується у виробках для посилення заброньової дії, а Al для отримання високошвидкісних КС з екзотермічним ефектом при взаємодії з перепороною. Екзотермічний ефект від присутності Al добре ілюструють криві, показані на Рис. 5. Тут показані залежності величини об'єму каналів різних матеріалів (СтЗ-АМЦн і Ст45) від вмісту Al в двох композитах (криві 1, 2) і PTFE в третьому композиті (крива 3). Вони показують, що у разі оптимального складу Cu-Al та Cu-W-Pb-Al об'єм каналу збільшується майже в два рази, а у разі композиту Cu-PTFE – приблизно в чотири рази. Враховуючи, що енергія, яка виділяється в осередку удару, корелює з об'ємом каналу, можна стверджувати, що матеріал КС та високошвидкісних КО є потужним засобом впливу на процес деформування і руйнування мішені [21]. Пластичність металу і час до початку руйнування КС у вільному польоті залежить від технології виготовлення та обробки. На Рис. 1 показано, як впливає розмір зерна в матеріалі струменя на час до початку руйнування КС з моменту детонації (Рис. 6а) і глибину пробиття мішені (Рис. 6б) на різних відстанях від мішені (5 калібрів і 20 калібрів заряду) [19].

Зазначимо, що форма і розмір зерна впливають на глибину пробиття КЗ з лайнерами із порошкових матеріалів [24]. Розміри зерен Al, в монометалічному матеріалі і в композитах складала (2...60) мкм. Cu і W – в діапазоні (20...140) мкм.



а



б

Рис. 6. Вплив розміру зерна матеріалу КС на час до початку руйнування (а) і глибину пробиття і КС (б). Калібр заряду – 81 мм [19]

Відзначимо основні фізичні ефекти і чинники, які відрізняють процес проникання КС і КЕ з пористих лайнерів в метали і неметали:

- при ударі і прониканні пористих КС в ньому виникає приєднана ударна хвиля через нижчу швидкість звуку у порівнянні з монолітним металом;
- ударні адіабати пористих матеріалів в координатах тиск – густина лежать вище, ніж ударна адіабата монолітного металу [6];

За рахунок стиснення пористого матеріалу КС (КЕ) на фронті і за фронтом ударної хвилі в осередку ударної взаємодії виділяється енергія більша, ніж при ударі КС і КЕ з монолітного металу. Це призводить до більшого розігріву матеріалу КС (КЕ) і мішені. В результаті утворюється канал більшого об'єму при прониканні металічних КС із

Табл. 2. Вплив властивостей ВР і матеріалу лайнера ($2\alpha = 42^\circ$) на швидкість КС у термінах «швидкість струменя (км/с) / час до руйнування (мкс)»

Вибухова речовина	Швидкість детонації	Грубозернистий ЕТР ~ 100 мкм	Дрібнозернистий ОФНС ~ 25 мкм
Склад В. 150μ RDX	7.92	7.7/116	7.8/154
RX-08-FO. 60μ НМХ. NP	8.06	–	8.0/154
RX-08-GB. 8μ НМХ. FEFO	8.24	–	8.3/167
RX-08-GG. 60μ НМХ. FEFO	8.24	–	8.1/173
OCTOL 75/25. 470μ НМХ	8.48	8.5/122	8.5/174
RX-08-EL. 60μ НМХ. FEFO	8.51	8.8/122	8.6/173

пористих мономатеріалів і композитних матеріалів [5, 7, 18]. Більшість експериментальних даних показує, що поява пористості в металі лайнера призводить до збільшення діаметру отвору. В цілому зрозуміло, що зменшення щільності призводить до збільшення швидкості КС разом з тими ефектами, які перераховані вище. Це спричиняє більші розміри, в тому числі, об'єм каналу.

4. ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВР І КОНСТРУКЦІЯ ЗАРЯДУ

На глибину пробиття окрім всього іншого впливають енергетичні характеристики ВР, зокрема швидкість детонації, а також початкова температура матеріалу лайнера. В Табл. 2 показано, як впливає швидкість детонації ВР на швидкість КС для двох матеріалів кінцевого лайнера: евтектоїдного сплаву (Pb-Sn-ЕТР) і високочистої безкисневої міді (ОФНС – oxygen-free high-conductivity cooper) [19].

Кут при вершині кінцевого лайнера – 42° ; діаметр основи – 81 мм [19]. ВР на основі гексогену (склад В, верхня строка) і октогену (всі інші з різними флегматизаторами; октол 75/25 – октоген з тротилом 75/25). Розмір зерна октогену коливається в межах від 8 мкм до 470 мкм. Як видно з наведених даних, залежність швидкості КС від швидкості детонації близька до лінійної. Вплив матеріалу лайнера на час до початку руйнування КС (break-up time) також підтверджується даними Табл. 2.

5. ВПЛИВ СХЕМИ ЗБУДЖЕННЯ ДЕТОНАЦІЇ НА ПАРАМЕТРИ КУМУЛЯТИВНИХ ТЕЧІЙ

Відомі дві основні схеми збудження детонації в зарядах кумулятивної дії: із точки на осі симетрії (Рис. 7а) і кільцева схема ініціювання детонації (Рис. 7б), наприклад за допомогою інертної лінзи, розміщеної в тілі заряду, або за допомогою плоского генератора детонаційної хвилі в конструкції двошарового заряду [22, 23]. Картинки, показані на Рис. 7, отримані авторами в чисельних експериментах з детонації заряду і утворення КС із мідних лайнерів з кутами при вершині $2\alpha = 42^\circ$ і $2\alpha = (38 \dots 50^\circ)$. Аналізу результатів цього моделювання буде присвячена окрема стаття. В даній роботі показано, як формується фронт хвилі детонації (темним кольором) при різних схемах ініціювання вибуху. Основна відмінність хвильових картин – утворення махівської конфігурації (диску Маха) на осі заряду (Рис. 7б) в режимі перестиснутої детонації, параметри якої значно перевищують відповідні параметри нормальної детонації Чепмена–Жуге. Це збільшує

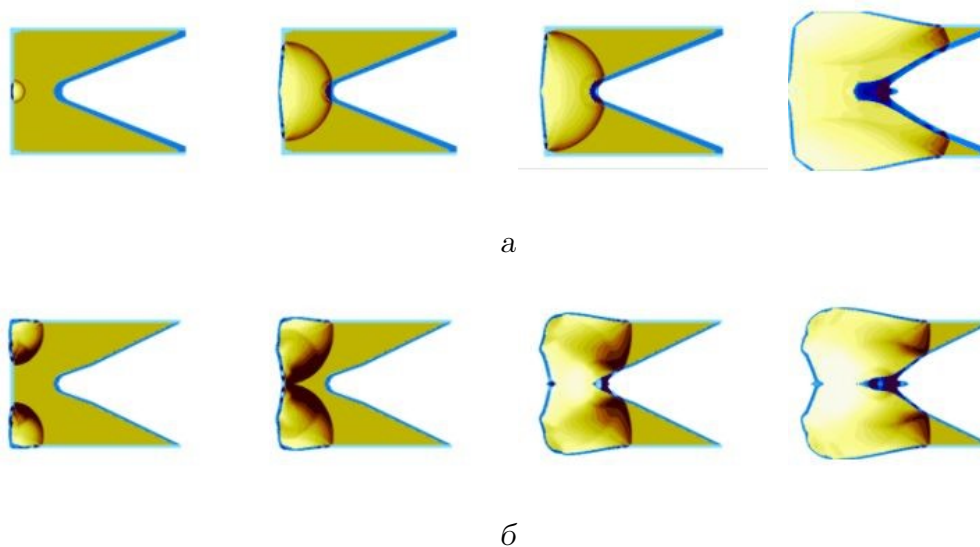


Рис. 7. Окремі кадри із відео розвитку детонації зарядів і утворення КС у разі збудження детонації:
а — у точці на осі симетрії, б — по кільцю в тильній області заряду

швидкість КС приблизно на 1000 м/с [23]. Збільшення швидкості КС на 750 м/с ми отримали в наших чисельних експериментах із схемами, показаними на Рис. 7. Крім хвилі детонації на матеріал лайнера при точковій схемі ініціювання вибуху діє ударна хвиля, яка утворюється при відбитті хвилі детонації від корпусу (Рис. 7а, крайній правий кадр).

Початкова температура матеріалу лайнера і наявність корпусу заряду із жорсткого матеріалу збільшують глибину пробиття на (10...15) % [15,24]. Початкова температура, як і наявність пористості в матеріалі лайнера сприяють зменшенню в'язкості матеріалу лайнера при утворенні КС і при прониканні в перепону.

6. ВИСНОВКИ

Основними технологічними і конструкційним чинниками, які визначають ефективність КЗ і глибину пробиття є швидкість детонації і схема її ініціювання, форма і товщина лайнера, а також матеріал лайнера. Вони суттєво впливають на глибину пробиття і об'єм каверни, збільшуючи глибину пробиття приблизно на (12...40) %, об'єм каверни — на (50...90) %, залежно від матеріалу лайнера і мішені. Інші фізико-технічні чинники, такі як наявність чи відсутність жорсткого корпусу, початкова температура лайнера впливають менше: в межах (10...15) % на металічних мішенях.

Короткий огляд робіт в області кумуляції енергії вибуху показує, що дослідження впливу форми і матеріалу лайнера та схеми детонації зарядів є перспективним напрямком для оптимізації їх конструкцій.

REFERENCES

- [1] I. V. Minin and O. V. Minin, "World history of the development of cumulative munitions," in *Russian Scientific and Technical Conference "Science. Industry. Defense"*.

- Novosibirsk: NSTU, 2003, pp. 51–52.
- [2] G. Birkhoff, D. P. MacDougall, E. M. Pugh, and S. G. Taylor, “Explosives with lined cavities,” *Journal of Applied Physics*, vol. 19, no. 6, pp. 563–582, 1948. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1698173>
- [3] M. A. Lavrentiev, “Shaped charge and the principle of its operation,” *Uspekhi Matematicheskikh Nauk*, vol. XII, no. 4, pp. 41–56, 1957.
- [4] S. V. Fedorov and Y. M. Bayanova, “Penetration of long strikers under hydrodynamic conditions with allowance for the material compressibility,” *Technical Physics*, vol. 56, no. 9, pp. 1266–1271, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063784211090088>
- [5] Y. I. Voitenko and V. P. Buhaiets, “Effect of aluminum on impact properties of composite cumulative jets,” *Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu Ukraini “Kiïvs'kij politehničnij institut”. Seriâ “Girnictvo”*, no. 30, pp. 36–48, 2016. DOI: <https://doi.org/10.20535/2079-5688.2016.30.67626>
- [6] H. Shekhar, “Theoretical modeling of shaped charges in the last two decades (1990–2010),” *Central European Journal of Energetic Materials*, vol. 9, no. 2, pp. 155–185, 2012.
- [7] Y. A. Trishin and S. A. Kinelovskii, “Effect of porosity on shaped-charge flow,” *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, vol. 36, no. 2, pp. 272–281, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf02699373>
- [8] L. P. Orlenko, Ed., *Physics of explosion*. Moscow: Fizmatlit, 2002.
- [9] L. Habera, K. Hebda, P. Koslik, and T. Sałaciński, “The shooting tests of target perforating ability, performed on cast concrete cylinders,” *Central European Journal of Energetic Materials*, vol. 17, no. 4, pp. 584–599, 2020. DOI: <https://doi.org/10.22211/cejem/132066>
- [10] T. Elshenawy, Q.-M. Li, and A. Elbeih, “Experimental and numerical investigation of zirconium jet performance with different liner shapes design,” *Defence Technology*, vol. 18, no. 1, pp. 12–26, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.11.019>
- [11] H. Kemmoukhe, S. Savić, S. Terzić, M. Lisov, N. Rezgui, and H. Sedra, “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, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5937/str1901010k>
- [12] S. V. Fedorov, “Numerical simulation of the formation of shaped-charge jets from hemispherical liners of degressive thickness,” *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, vol. 52, no. 5, pp. 600–612, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1134/s0010508216050117>
- [13] S. V. Fedorov, S. V. Ladov, Y. M. Nikol'skaya, V. D. Baskakov, M. A. Baburin, A. E. Kurepin, A. A. Gorbunkov, and A. S. Pirozerskii, “Formation of a high-velocity particle flow from shaped charges with a liner consisting of a hemisphere and a

- degressive-thickness cylinder,” *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, vol. 53, no. 4, pp. 479–482, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1134/s0010508217040128>
- [14] S. V. Ladov, Y. M. Nikol'skaya, and S. V. Fedorov, “Numerical analysis of the formation of shaped-charge jets from charges with conical and semi-spherical liners of variable thickness,” *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, vol. 55, no. 4, pp. 466–470, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1134/s0010508219040130>
- [15] *The development of that thoroughly methodical and technical means for the recovery of energy vibration in the boreholes. Report no. DR 0100U000125.* Kyiv: UkrDGRI, 2003.
- [16] T. Elshenawy, A. Reyad, E. Ezzat, and M. A. Elkader, “Influence of liner wall thickness on the penetration performance of PETN-HTPB PBX-based shaped charges into steel targets,” *Central European Journal of Energetic Materials*, vol. 19, no. 1, pp. 63–90, 2022. DOI: <https://doi.org/10.22211/cejem/147682>
- [17] C. Voumard, H. Roduner, W. R. Santschi, and H. Wisler, “Performances and behaviour of WCu-pseudo-alloy shaped charges with a simple model for calculating the stand-off curve,” in *Proceedings of 19th International Symposium on Ballistics. Vol. 1.* Interlaken, Switzerland: DEStech Publications, 2001.
- [18] Y. A. Trishin, “Some physical problems of cumulation,” *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, vol. 41, no. 5, pp. 773–787, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf02468722>
- [19] W. Walters, *Introduction to shaped charges.* Aberdeen Proving Ground, MD: Army Research Laboratory, 2007.
- [20] S. M. Buc, *Shaped charge liner materials: Resources, processes, properties, costs, and applications. ADA278191.* Arlington VA: System Planning Corp, 1991.
- [21] Y. Voitenko, R. Zakusylo, and S. Zaychenko, “Influence of the striker material on the results of high-speed impact at a barrier,” *Central European Journal of Energetic Materials*, vol. 18, no. 3, pp. 405–423, 2021. DOI: <https://doi.org/10.22211/cejem/142615>
- [22] D. Pyka, A. Kurzawa, M. Bocian, M. Bajkowski, M. Magier, J. Sliwinski, and K. Jamroziak, “Numerical and experimental studies of the LK type shaped charge,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 19, p. 6742, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10196742>
- [23] X.-F. Zhang and L. Qiao, “Studies on jet formation and penetration for a double-layer shaped charge,” *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, vol. 47, no. 2, pp. 241–248, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1134/s0010508211020134>
- [24] Y. I. Voitenko, S. V. Goshovskii, A. G. Drachuk, and V. P. Bugaets, “Mechanical effect of shaped charges with porous liners,” *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, vol. 49, no. 1, pp. 109–116, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1134/s0010508213010127>

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Минин И. В., Минин О. В. Мировая история развития кумулятивных боеприпасов // Российская научно-техническая конференция «Наука. Промышленность. Оборона». — Новосибирск : НСТУ. — 2003. — С. 51–52.
- [2] Explosives with lined cavities / Birkhoff G., MacDougall D. P., Pugh E. M., and Taylor S. G. // *Journal of Applied Physics*. — 1948. — Vol. 19, no. 6. — P. 563–582.
- [3] Лаврентьев М. А. Кумулятивный заряд и принцип его работы // *Успехи математических наук*. — 1957. — Т. XII, № 4. — С. 41–56.
- [4] Федоров С. В., Баянова Я. М. Особенности гидродинамического режима проникновения удлиненных ударников с учетом сжимаемости материалов // *Журнал технической физики*. — 2011. — Т. 81, № 9. — С. 45–51.
- [5] Войтенко Ю. И., Бугаец В. П. Влияние алюминия на ударные свойства композитных кумулятивных струй // *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»*. — 2016. — № 30. — С. 36–48.
- [6] Shekhar H. Theoretical modeling of shaped charges in the last two decades (1990–2010) // *Central European Journal of Energetic Materials*. — 2012. — Vol. 9, no. 2. — P. 155–185.
- [7] Тришин Ю. А., Кинеловский С. А. О влиянии пористости на кумулятивное течение // *Физика горения и взрыва*. — 2000. — Т. 36, № 2. — С. 122–132.
- [8] *Физика взрыва* / под ред. Орленко Л. П. — Москва : Физматлит, 2002. — 650 с.
- [9] The shooting tests of target perforating ability, performed on cast concrete cylinders / Habera Ł., Hebda K., Koslik P., and Sałaciński T. // *Central European Journal of Energetic Materials*. — 2020. — Vol. 17, no. 4. — P. 584–599.
- [10] Elshenawy T., Li Q.-M., Elbeih A. Experimental and numerical investigation of zirconium jet performance with different liner shapes design // *Defence Technology*. — 2022. — Vol. 18, no. 1. — P. 12–26.
- [11] Improvement of the shaped charge jet penetration capability by modifying the liner form using AUTODYN-2D / Kemmoukhe H., Savić S., Terzić S., Lisov M., Rezgui N., and Sedra H. // *Scientific Technical Review*. — 2019. — Vol. 69, no. 1. — P. 10–15.
- [12] Федоров С. В. Численное моделирование формирования кумулятивных струй полусферическими облицовками дегрессивной толщины // *Физика горения и взрыва*. — 2016. — Т. 52, № 5. — С. 116–130.
- [13] Формирование потока высокоскоростных частиц кумулятивными зарядами с облицовкой типа полусфера-цилиндр дегрессивной толщины / Федоров С. В., Ладов С. В., Никольская Я. М., Баскаков В. Д., Бабурин М. А., Курепин А. Е., Горбунков А. А. и Приозерский А. С. // *Физика горения и взрыва*. — 2017. — Т. 53, № 4. — С. 122–125.

- [14] Ладов С. В., Никольская Я. М., Федоров С. В. Численный анализ формирования кумулятивных струй из зарядов с коническими и полусферическими облицовками // Физика горения и взрыва. — 2019. — Т. 55, № 4. — С. 103–107.
- [15] Розробка та вдосконалення методичних та технічних засобів для використання енергії вибуху у свердловинах. Звіт № ДР 0100U000125. — Київ : УкрДГРІ, 2003. — 363 с.
- [16] Influence of liner wall thickness on the penetration performance of PETN-НТРВ PBX-based shaped charges into steel targets / Elshenawy T., Reyad A., Ezzat E., and Elkader M. A. // Central European Journal of Energetic Materials. — 2022. — Vol. 19, no. 1. — P. 63–90.
- [17] Performances and behaviour of WCu-pseudo-alloy shaped charges with a simple model for calculating the stand-off curve / Voumard C., Roduner H., Santschi W. R., and Wisler H. // Proceedings of 19th International Symposium on Ballistics. Vol. 1. — Interlaken, Switzerland : DEStech Publications. — 2001.
- [18] Тришин Ю. А. О некоторых физических проблемах кумуляции // Прикладная механика и техническая физика. — 2000. — Т. 41, № 5. — С. 10–26.
- [19] Walters W. Introduction to shaped charges. — Aberdeen Proving Ground, MD : Army Research Laboratory, 2007. — 110 p.
- [20] Buc S. M. Shaped charge liner materials: Resources, processes, properties, costs, and applications. ADA278191. — Arlington VA : System Planning Corp, 1991. — 17 p.
- [21] Voitenko Y., Zakusylo R., Zaychenko S. Influence of the striker material on the results of high-speed impact at a barrier // Central European Journal of Energetic Materials. — 2021. — Т. 18, № 3. — С. 405–423.
- [22] Numerical and experimental studies of the LK type shaped charge / Pyka D., Kurzawa A., Bocian M., Bajkowski M., Magier M., Sliwinski J., and Jamroziak K. // Applied Sciences. — 2020. — Vol. 10, no. 19. — P. 6742.
- [23] Чжан С., Цяо Л. Формирование и внедрение струи, генерируемой двухслойным кумулятивным зарядом // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 2. — С. 128–136.
- [24] Механическое действие кумулятивных зарядов с пористыми облицовками / Войтенко Ю. И., Гошовский С. В., Драчук А. Г. и Бугаець В. П. // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 1. — С. 125–131.

**Ю. И. Войтенко, В. В. Бойко, О. О. Костюк,
Ю. М. Сидоренко, С. В. Гошовский**

**Современные кумулятивные заряды и пути повышения
их эффективности**

Проведен анализ известных теоретических и экспериментальных исследований функционирования кумулятивных зарядов с лайнерами различных форм из различных материалов для выбора путей совершенствования изделий и получения кумулятивных струй и ударных ядер с большей кинетической энергией, чем для традиционных форм (конус и сфера). Выделены основные и второстепенные факторы, влияющие на кинетическую энергию кумулятивных струй и ударных ядер и глубину пробития плотных преград, а именно: энергетические характеристики взрывчатых материалов (скорость детонации и энергия взрыва), форма, толщина и материал лайнера, схема возбуждения детонации, наличие корпуса заряда, а также начальная температура лайнера. Проанализировано влияние материала лайнера и технологии его изготовления на глубину пробития и объем каверны. Отдельно рассмотрены монолитные, пористые и композитные пористые материалы и наиболее перспективные из них для увеличения глубины пробития и объема каверны. Отмечается существенное влияние структуры и химического состава материала лайнера на результат работы кумулятивного заряда, в частности размера и формы зерна в монолитных металлах, размера формы зерен в порошковых монометаллических и композитных материалах. Обоснованы диапазоны основных конструкционных параметров лайнеров кумулятивных зарядов конической и близких к ней форм, обеспечивающих максимальную глубину пробития препятствия: углов при вершине, толщин, а также влияние постоянства или изменяемости толщины лайнера на параметры кумулятивных струй в свободном полете и глубину проникновения в перепонку. Рассмотрены способы формирования кумулятивным взрывом безградиентных или малоградиентных компактных элементов, имеющих большую кинетическую энергию, чем традиционные ударные ядра. Получено дальнейшее развитие представлений о путях перспективных исследований с целью разработки конструкций кумулятивных зарядов и материалов лайнеров для увеличения пробивной способности кумулятивных струй, компактных элементов и ударных ядер.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: кумулятивный заряд, детонация, лайнер, кумулятивная струя, ударное ядро

**Yu. I. Voitenko, V. V. Boiko, O. O. Kostyuk,
Yu. M. Sidorenko, S. V. Goshovskyi**

Modern shaped charges and ways of increasing their efficiency

An analysis of well-known theoretical and experimental studies of the functioning of shaped charges with liners of different shapes from different materials was performed to choose ways to improve shaped charges and obtain shaped charge jets and explosively formed projectiles with greater kinetic energy than for traditional forms (cone and sphere). The main and secondary factors that affect the kinetic energy of shaped charge jets and explosively formed projectiles and the penetration depth of dense barriers are highlighted, namely: energy characteristics of explosive materials (detonation velocity and explosion energy), shape, thickness, and material of the liner, detonation excitation scheme, presence of the charging case, as well as the initial temperature

of the liner. The impact of the liner material and its manufacturing technology on the depth of penetration and the volume of the cavern was analyzed. Solid, porous, and composite porous materials are considered separately and the most promising of them for increasing the penetration depth and volume. A significant influence of the structure and chemical composition of the liner material on the performance of the shaped charge is noted, in particular, grain size and shape in solid metals, and grain size and shape in powder monometallic and composite materials. Reasonable ranges of the main design parameters of liners of cumulative charges of conical and close to its forms, which provide the maximum penetration depth of the barrier: angles at the top, thicknesses, as well as the effect of constancy or variability of the thickness of the liner on the parameters of shaped charge jets in free flight and the depth of penetration into the barrier. Methods of formation of gradientless or low-gradient compact elements by cumulative explosion, which have higher kinetic energy than traditional explosively formed projectiles, are considered. Further development of ideas about ways of prospective research with the aim of developing constructions of shaped charges and materials of liners to increase the penetration capacity of cumulative jets, compact elements, and explosively formed projectiles was obtained.

KEY WORDS: shaped charge, detonation, liner, cumulative jet, explosively formed projectiles