

УДК 623.451.4.082.5:623.56

ПРО КАЛІБР КУМУЛЯТИВНОГО ЗАРЯДУ І СТАН РЕЧОВИНИ В ОСЕРЕДКУ УДАРУ ПРИ ПРОБИТТІ ЦІЛЬНОЇ ПЕРЕПОНИ

 Ю. І. Войтенко^{1†},  О. Ю. Войтенко²,  А. М. Пасічник¹

¹Інститут гідромеханіки НАН України
вул. Марії Капніст, 8/4, 03057, Київ, Україна
[†]E-mail: voytenkou1@gmail.com

²Інститут біоколоїдної хімії ім. Ф. Д. Овчаренка НАН України
бульв. Академіка Вернадського, 42, 03142, Київ, Україна

Отримано 25.01.2025 ◊ Прийнято 22.12.2025 ◊ Опубліковано 03.09.2026

Дослідження спрямовані на визначення основних параметрів функціонування кумулятивних зарядів глибокого пробиття: швидкості лідируючої частини кумулятивного струменя, щільності його матеріалу та необхідного калібру для гарантованого пробиття перепони заданої товщини для двох облицювань конічної форми, які часто використовуються у виробках цивільного та військового призначення. За результатами досліджень отримано залежності швидкості мідного кумулятивного струменя від швидкості детонації для вибухових матеріалів на основі гексогену та октогену, які близькі до лінійних для двох кутів конічних облицювань при вершинах 42° і 50°. У першому наближенні ці залежності можна продовжити в область вибухових матеріалів з меншими та більшими швидкостями детонації з метою їх використання для проектування зарядів різноманітного призначення. Проаналізовано основні моделі проникання градієнтних кумулятивних струменів з позиції можливості застосування їх для інженерного оцінювання калібру кумулятивного заряду з метою гарантованого пробиття обмежених перепон. Для оцінки глибини пробиття щільних перепон використано формули на основі моделі Елісона–Віталі, в яких основними параметрами є швидкість лідируючої частини кумулятивного струменя; критична швидкість елемента кумулятивного струменя, при якій процес проникання припиняється; а також щільності матеріалів кумулятивного струменя й мішені та відстань від заряду до мішені. Отримані результати можуть бути використані для швидкого визначення калібру заряду з двома формами облицювань при виконанні вибухових робіт із вибуховими речовинами місцевого приготування та пластичними вибуховими речовинами, а також зі штатними вибуховими матеріалами на основі тринітротолуолу, гексогену і октогену. Звертається увага на стан речовин в зоні взаємодії кумулятивного струменя та перепони.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: кумулятивний заряд, детонація, облицювання, кумулятивний струмінь, калібр заряду

1. ВСТУП

Часто в практиці вибухових робіт у цивільній чи військовій галузях необхідно попередньо визначити калібр кумулятивного заряду (КЗ) для пробиття напівнескінченної перепони на певну глибину або пробиття перепони певної товщини. Існують різні методи розрахунку глибини проникання кумулятивного струменя (КС) в напівнескінченні перепони, в тому числі точні і наближені методи механіки суцільного середовища, емпіричні й фізичні формули [1–5]. Одним із обмежень їхнього застосування є необхідність точного знання рівнянь стану матеріалів КС і мішені, корпусу КЗ, а також повітря і продуктів детонації вибухової речовини (ВР), що не завжди є в наявності для сумішевих ВР. Є невелика база експериментальних даних щодо прибивної здатності кумулятивних зарядів різних конструкцій [6–8], але її недостатньо для екстраполяції на інші види ВР.

Більш привабливими для інженерної практики є наближені аналітичні методи розрахунку, які дозволяють швидко оцінювати глибину проникнення КС або кінетичного ударника (КУ) в перепону. Однією з основних умов їхнього застосування є наявність знань про масово-кінетичні характеристики КС, які можна отримати за допомогою точних методів моделювання чи в експерименті. Окрім того, необхідні знання про деякі фізичні параметри матеріалів ударника і мішені при їх взаємодії або процесі проникання. У якості прикладу можна навести величини динамічної міцності матеріалу мішені й ударника як твердих тіл.

Мета цього дослідження полягала в розробці експрес-методу оцінки калібру кумулятивного заряду для гарантованого пробиття твердої перепони обмеженої товщини, виготовленої зі щільного конструкційного матеріалу. Також передбачався аналіз стану матеріалів струменя та перепони в зоні ударної взаємодії при швидкостях удару понад 4 км/с. При цьому застосовувались методи математичного та фізичного моделювання процесів кумуляції та проникання КС у тверді середовища, а також метод електронної мікроскопії та мікрозондового аналізу з використанням растрового електронного мікроскопу РЕМ-106.

2. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Глибина пробиття перепон кумулятивним зарядом L визначається ефективною довжиною кумулятивного струменя l_0 на момент завершення сплескування облицювання. Одним із визначальних параметрів, які характеризують процес проникання, є критична швидкість руху КС, або КУ в матеріалі мішені V_c , при якій він припиняється в даному матеріалі. Так, для мідного КС критична швидкість V_c крайнього елемента струменя при прониканні в середньо вуглецеву сталь складає залежно від її твердості (2050...2200) м/с, у броньову сталь – 3000 м/с, у бетон – 1500 м/с, у лід – 1800 м/с, у пісок – 1000 м/с [4]. Ефективна довжина струменя визначається відстанню від лідируючого елемента, який рухається із швидкістю V_0 , до елемента, швидкість якого дорівнює V_c . Для конічних облицювань з кутами при вершинах конусів $2\alpha = (42 \dots 55)^\circ$ згідно з нашими результатами моделювання вона складає від трьох до двох калібрів d_c , поступово зменшуючись при збільшенні кута від 42° до 55° [8].

В рамках гідродинамічної моделі на основі ідеальної нестисливої рідини L не залежить від швидкості удару V_0 , а залежить від величини l_0 і відношення густин матеріалів

струменя ρ_j і перепони, ρ_t [5, 6]

$$L = l_0 \sqrt{\frac{\rho_j}{\rho_t}}. \quad (1)$$

Ця формула задовільно описує проникання струменя в перепони із пластичних матеріалів, наприклад металів, у відносно вузькому діапазоні швидкостей проникання u [5]:

$$\sqrt{2}c_f^j < u < c_l^j, \quad \sqrt{2}c_f^t < u < c_l^t, \quad (2)$$

де c_f^j , c_l^j , c_f^t , c_l^t – граничні швидкості росту тріщин і поздовжнього звуку в матеріалах струменя і перепони. Основним недоліком гідродинамічної теорії, як відомо, є обмеженість швидкостей проникання згідно формули (2) і нехтування градієнтом швидкості вздовж КС.

Міцність матеріалу перепони і ударника (КС або стержня) враховувалась шляхом включення в рівняння Бернуллі додаткових членів [9]:

$$H_D + k_t \rho_t u^2 = \sigma_{sD} + k_j \rho_j (V - u)^2, \quad (3)$$

$$V_c = \sqrt{\frac{H_D - \sigma_{sD}}{k_j \rho_j}}, \quad (4)$$

де H_D , σ_{sD} – динамічна твердість і динамічна межа плинності відповідно матеріалів перепони і ударника; k_t , k_j – коефіцієнти форми перепони і ударника. Формулу (4) можна отримати із формули (3) при $u = 0$.

Якщо даних щодо визначення динамічної межі плинності металів в літературі цілком достатньо, наприклад [4], то дані для визначення динамічної твердості металів і гірських порід практично відсутні. Використання значень статичної твердості за Брінеллем в розрахунках за формулою (4) дає занижені в декілька разів результати у порівнянні з експериментальними даними, наведеними вище.

В [5] показано, що в рамках моделі нерівноважної термодинаміки при $u \geq 1000$ м/с, $\nu \approx (10^{-3} \dots 10^{-2})$ м²/с (в'язкість металу); $Re = 2.5d_0/\nu \approx (2 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^3)$, де характерний діаметр струменя d_0 становить 10^{-3} м. Це значно більше критичного значення числа Рейнольдса Re_r , яке лежить у межах від 1 до 2. Тобто, при $c_f^t < u < c_l^t$ рух струменя в перепоні проходить в турбулентному режимі. В результаті автором отримано наступні формули для глибини пробиття

$$L = \varphi \beta_0^{-1} l_0 \sqrt{\frac{\rho_j}{\rho_t}}; \quad \varphi = \sqrt{\frac{1 + 2(Re_{cr}^j)^{-1}}{1 + 2(Re_{cr}^t)^{-1}}}; \quad \beta_0 = \sqrt{1 - \frac{2(Q^t - Q^j)}{\rho_t (1 + 2(Re_{cr}^t)^{-1}) u^2}}, \quad (5)$$

де $Q^t = 0.5\rho^t(c_T^t)^2$; $Q^j = 0.5\rho^j(c_T^j)^2$ – «міцнісні» складові енергії, що дисипується в режимі гідродинамічної деформації матеріалів перепони і струменя.

Згідно з [5] при $u < l$ матеріали взаємодіючих КС і перепони знаходяться в кристалічній фазі і лише при $u > l$ переходять в рідкий стан біля контактної поверхні. Але згідно нашим експериментальним даним, якщо КС складається із реагуючих пористих матеріалів Cu–Al, Ni–Al, PTFE–Al тощо), то вони (матеріал КС і перепони) переходять

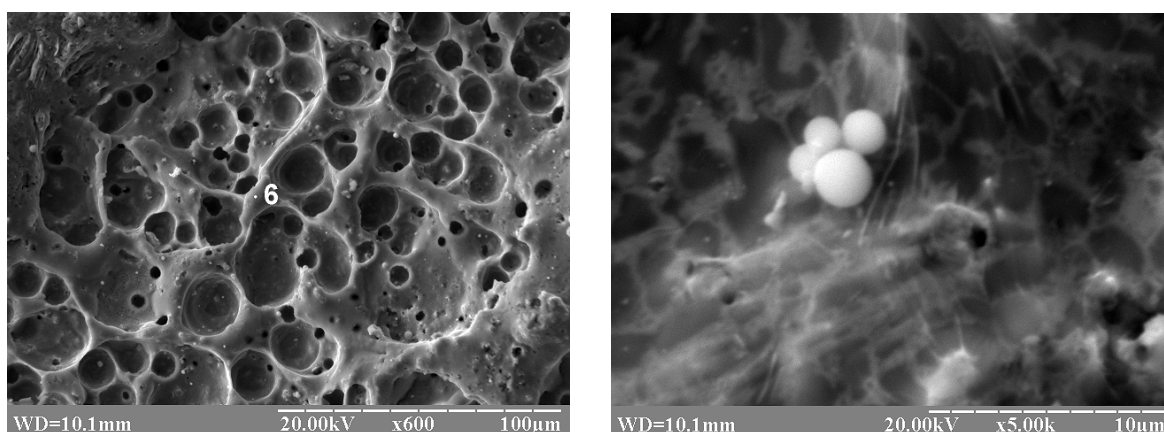


Рис. 1. На лівому знімку – морфологія матеріалу, взятого на стінці кратера 6 (Al–Fe–Cu в порядку зменшення кількості компоненту). На правому знімку – частинки сферичної форми, видимі на матеріалі при сильнішому збільшенні

Табл. 1. Теплові властивості міді, алюмінію та заліза

Температура, °C		Теплота, МДж/кг		Теплоємність, кДж/(кг·К)
плавлення	випаровування	плавлення	випаровування	
1083	2877	0.206	4.82	0.389
660	2467	0.398	10.52	0.033
1535	2861	0.247	6.08	0.450

в рідкий стан і частково випаровується також при $u < u_l$ [7]. Це очевидно забезпечується додатковою енергією, яка виділяється при ударі струменя із реакційно активних матеріалів по твердій перепоні. На Рис. 1 показані морфологія поверхні застиглого розплаву із стінок кратера і характерні частинки правильної сферичної форми, які можуть свідчити про часткове випаровування і конденсацію розплавлених матеріалів біля контактної поверхні. Струмінь із композиту Cu–Al, мішень – із маловуглецевої сталі Ст. 3 (верхня пластина) плюс сплав алюмінію АМЦ-н [7].

Ще раніше в роботі [10] показано, що при прониканні мідного КС в кераміку (нітрид кремнію) і в скло з швидкістю порядку 4000 м/с аналогічні процеси: плавлення матеріалу КС і частково його випаровування відбуваються з монолітною міддю.

В роботі [11] наведені температури нагріву пористих облицювань з міді в ударній хвилі. Зокрема показано, що у разі облицювань низької пористості ($m = \rho_0/\rho_{00}$ від 1.2 до 1.5, де ρ_0 і ρ_{00} – густини суцільного й пористого матеріалу) температура підвищується при стисненні пористої міді в 1.2 рази збільшується відповідно до 1200 К і 4820 К. В наших експериментах пористість складала від 1.12 у вершині облицювань до 1.49 біля основи конуса. Тобто, з урахуванням даних в таблиці матеріал облицювання (пориста мідь, або композит Cu–Al) розплавляється і частково випаровується, що і підтверджують результати електронної мікроскопії (Рис. 2). Перевага пористих облицювань в порівнянні з облицюваннями із монолітних металів пояснюється залежністю в'язкості рідких металів від температури [11]

$$\nu = A \exp(E/RT),$$

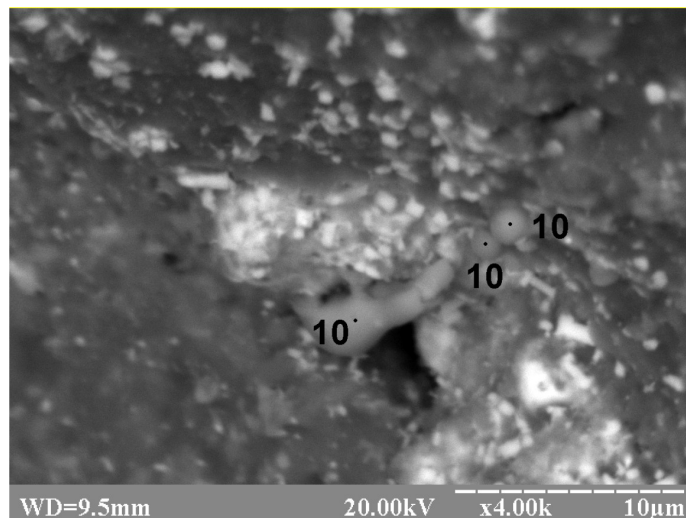


Рис. 2. Морфологія матеріалу, викинутого з кратера 10 (Fe–Cu–Al в порядку зменшення кількості компоненту)

де γ – константа; E_a – енергія активації, яка становить порядку $(40 \dots 60)10^6$ Дж/кг/атом.

Тобто, з ростом температури кінематична в'язкість експоненційно зменшується. Опоередковано це підтверджується експериментальними даними щодо глибини пробиття твердих перепон струменями із монолітних і пористих лайнерів [11,12]. КС із пористих лайнерів проникають глибше на $(25 \dots 30)\%$ за інших рівних умов. При прониканні градієнтного КС в тверду перепону поступово зменшується швидкість проникання, ступінь стиснення матеріалу КС, температура матеріалу КС і перепони. Тобто в'язкість поступово збільшується, температура зменшується, і врешті-решт хвостова частина КС переходить з рідкого стану в кристалічний [4,6].

В попередніх моделях проникання не враховано наявність градієнту швидкості струменя вздовж нього, наявність якого показано в численних експериментальних і теоретичних роботах. Крім того, при $\rho^j = \rho^t$ ліва формула із (5) перетворюються в формулу (1) при $\varphi = \beta_0 = 1$, а в праву формулу із цієї групи входить швидкість проникання КС u . Тобто, гідродинамічна теорія проникання КС є одним із випадків більш загальної теорії, викладеної в [5]. Для її визначення необхідно проводити додаткові розрахунки, або експериментальні дослідження. Зауважимо, що більше інформації про моделі проникання КС і стержнів в щільні перепони можна знайти в огляді [9] та інших роботах.

В рамках наступної моделі автори (Allison і Vitali) також нехтували міцністю і стисливістю матеріалів струменя і перепони, але врахували розподіл швидкості вздовж струменя, яка змінюється від V_0 в вершині КС до V_c в задній частині. Щодо нехтування стисливістю в роботі [9] показано, що дане припущення допустиме для металічних перепон і не є незначним для перепон з низькими швидкостями звуку (поліметилметакрилат, бетон, деякі гірські породи).

Наведемо формули для розрахунку глибини проникання градієнтного струменя для трьох випадків:

- а) проникання завершене до моменту руйнування струменя t_b ($t < t_b$);
- б) розрив струменя відбувається під час проникнення ($t_0 < t_b < t$);

в) розрив струменя відбувається до того, як струмінь досягає мішені.

Глибина проникання відповідно розраховується за формулами Діперсіо, Сімона та ерендіно на основі моделі Елісона–Віталі (model A-V), які дають цілком задовільний збіг результатів з експериментальними даними [1, 6].

Для випадку (а):

$$L = z_0 \left[\left(\frac{V_0}{V_c} \right)^{1/\gamma} - 1 \right] \quad \text{для} \quad 0 \leq z_0 < V_c t_b (V_c/V_0)^{1/\gamma}. \quad (6)$$

Для випадку (б):

$$L = \frac{1}{\gamma} \left[(1 + \gamma)(V_0 t_b)^{1/(1+\gamma)} z_0^{\gamma/(1+\gamma)} - V_c t_b \right] - z_0 \quad \text{для} \quad V_c t_b (V_c/V_0)^{1/\gamma} \leq z_0 < V_0 t_b. \quad (7)$$

Нарешті для випадку (в):

$$L = \left(\frac{V_0 - V_c}{\gamma} \right) t_b \quad \text{для} \quad V_0 t_b \leq z_0 < \infty. \quad (8)$$

В термінах V_0 , U_c формула, яка є аналогом рівняння (6) має вигляд [7]:

$$L = S \left[\left(\frac{V_0}{(1 + \gamma)U_c} \right)^{1/\gamma} - 1 \right], \quad (9)$$

$$0 \leq S < (1 + \gamma)U_c t_b \left[\frac{(1 + \gamma)U_c}{V_0} \right]^{1/\gamma}. \quad (10)$$

У формулах (6)–(10) z_0 – ефективна довжина струменя від початку координат до поверхні мішені; S – відстань від заряду до мішені; V_c – швидкість хвостової частини КС; U_c – критична швидкість хвостової частини в перепоні; $\gamma = 1/\mu$; $\mu = \sqrt{\rho_j/\rho_t}$; ρ_j , ρ_t – густини матеріалів КС і мішені.

На Рис. 3 показано відомі залежності швидкості лідируючої частини мідного КС V_{jm} для вибухових речовин з швидкостями детонації порядку (7000...8500) м/с на основі гексогену і октогену з різними флегматизаторами і двох кутів при вершинах облицювань: 42° і 50°, які достатньо часто використовуються в конструкціях КЗ. Графіки, представлені на рисунку, задовільно апроксимуються наступними формулами (відповідно нижня і верхня крива):

$$V_{jm} = 4000 + 33.3(\rho D^2 - 60), \quad (11)$$

$$V_{jm} = 6500 + 50(\rho D^2 - 80). \quad (12)$$

Для вибору калібру заряду для заданого кута при вершині конуса знаходимо величину ρD^2 . Із рівняння (11), або (12) – величину $V_0 = V_{jm}$. Із рівняння (6), вважаючи, що умова відсутності розривів в КС виконується, знаходимо величину z_0 для заданого

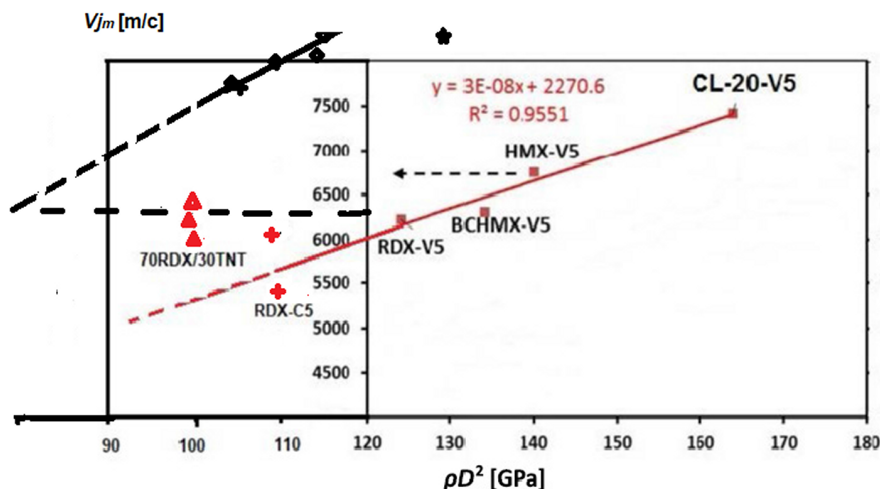


Рис. 3. Залежність швидкості струменя від густини та швидкості детонації ВР згідно з даними [13] (справа від осі) та [6] (зліва від осі).
Матеріал облицювання – монолітна мідь (нижня крива – $2\alpha = 50^\circ$, верхня – $2\alpha = 42^\circ$).
Червоні маркери $\blacktriangle$ і $+$ – експериментальні дані для ТГ-70/30 ($2\alpha \approx (15 \dots 50)^\circ$) і флегматизованого гексогену.
Чорні маркери: $+$ – результат розрахунку для $D = 8000$ м/с і $\rho = 1650$ кг/м³ [1];
 $\star$ – дані для $2\alpha = 42^\circ$ (облицювання з танталу та ВР на основі октогену [14])

L (товщини перепони). Калібр заряду вибираємо із умови розташування заряду на відстані, яка забезпечує максимальне бронепробиття нерозірваним струменем. Ця відстань згідно наших даних та даних інших авторів [4, 6] для промислових зарядів дорівнює приблизно $(1.5 \dots 3)$ калібри. Тому калібр вибираємо із співвідношення $d_c = z_0/n$, де $n = (1.5 \dots 2)$. Для цих значень параметра n користуємося формулою (1), маючи на увазі, що відстань від заряду до мішені складає $(1.5 \dots 2)$ калібри. Для інших, більших значень параметра n , який становить $(3 \dots 5)$, залежно від матеріалу облицювання, необхідно використовувати формули (7) і (8), або їхні аналоги в термінах $S-U_c$ [9]. На жаль, дані щодо критичних швидкостей проникання КС U_c в різні матеріали в літературі не систематизовані.

3. ПРИКЛАД

Товщина мішені $L = 100$ мм. Матеріал – маловуглецева ($V_c = 2100$ м/с), або броньова ($V_c = 3000$ м/с) сталь. $2\alpha = 50^\circ$; матеріал облицювання – мідь; відстань до мішені – два калібри заряду. ВР – пластик-4, $D = 7000$ м/с, $\rho = 1420$ кг/м³; визначити калібр заряду для цих мішеней.

Визначаємо із формули (12), або із графіка (нижня крива) для $\rho D^2 = 69.58$ ГПа $V_0 \approx 4300$ м/с. Для $n = 2$ знайдемо $d_c = 44$ мм для маловуглецевої і $d_c = 106$ мм – для броньової сталі. При тих же вихідних параметрах для $2\alpha = 42^\circ$, $V_0 = 6000$ м/с для броньової сталі $d_c = 46$ мм. Діаметр корпусу заряду при цьому складе $(50 \dots 60)$ мм залежно від його товщини.

Якщо матеріал облицювання і технологія його виготовлення такі, що КС проникає в мішень без розриву на більших відстанях заряд від мішені, ніж $2d_c$, тоді калібр за-

ряду можна ще зменшити. До таких матеріалів відноситься зокрема безкиснева мідь високої чистоти, в літературі ОФНС [6]. Іншим шляхом зменшення калібру заряду є підвищення точності виготовлення облицювання і швидкості детонації ВР. Але це вимагає застосування спеціальної прецизійної техніки пресування зарядів, або лиття ВР на основі сумішей ТНТ і гексогену, або октогену. В той же час сумішеві вибухові матеріали, такі, наприклад, як пластичні ВР, ВР на основі АС-ПАР-АІ дозволяють формувати заряди на місці проведення вибухових робіт.

4. ВИСНОВКИ

1. Для експрес-методу визначення калібру кумулятивного заряду найбільш зручною є модель проникання градієнтного струменя на основі А-V моделі разом з експериментальними залежностями швидкості струменя у вільному польоті V_0 від параметра ρD^2 (ρ – щільність; D – швидкість детонації вибухової речовини).
2. Узагальнено експериментальні дані щодо швидкості руху мідного кумулятивного струменя у вільному польоті V_0 для двох конфігурацій облицювань конічної форми з кутами при вершинах 42° і 50° . Запропоновані лінійні залежності $V_0(\rho D^2)$ і метод швидкого наближеного визначення калібру заряду для різних вибухових речовин.
3. Можна вважати остаточно встановленим процес переходу матеріалів струменя (Cu–Al) і перепони (Fe–Al) в зоні взаємодії в рідкий агрегатний стан з частковим випаровуванням при ударі із швидкостями $V_0 \geq (4.5 \dots 5)$ км/с.

ПОДЯКИ

Робота виконувалась частково в межах цільової програми досліджень НАН України.

REFERENCES

- [1] Y. Voitenko, Y. Sydorenko, R. Zakusylo, S. Goshovskii, S. Zaichenko, and V. Boyko, “On the influence of the liner shape and charge detonation scheme on the kinetic characteristics of shaped charge jets and explosively formed penetrators,” *Central European Journal of Energetic Materials*, vol. 20, no. 4, pp. 417–442, 2023. <https://doi.org/10.22211/cejem/173190>
- [2] Y. Voitenko, Y. Sydorenko, R. Zakusylo, V. Boyko, O. Artemiev, V. Bugaiets, and D. Zakusylo, “Influence of liner form and explosive on the velocity and mechanical action of a shaped-charge jet,” *Central European Journal of Energetic Materials*, vol. 21, no. 3, pp. 320–327, 2024. <https://doi.org/10.22211/cejem/193819>
- [3] 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. 12–25, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2020.11.019>
- [4] F. A. Baum, L. P. Orlenko, K. P. Stanyukovich, and B. I. Shekhter, *Physics of explosion: vol 2*, L. P. Orlenko, Ed. Moscow: Fizmatlit, 2004.

- [5] A. S. Balankin, “Physics of the penetration of a cumulative jet into porous media,” *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, vol. 25, no. 4, pp. 499–508, 1990. <https://doi.org/10.1007/bf00751562>
- [6] W. Walters, *Introduction to shaped charges*. Aberdeen Proving Ground, MD: Army Research Laboratory, 2007.
- [7] Y. I. Voitenko and V. P. Buhaiets, “Effect of aluminum on impact properties of composite cumulative jets,” *Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu Ukraïni “Kiïvs'kij politehničnij institut”. Seriâ “Girnictvo”*, no. 30, pp. 36–48, 2016. <https://doi.org/10.20535/2079-5688.2016.30.67626>
- [8] Y. I. Voitenko, Y. M. Sidorenko, V. V. Boiko, A. L. Han, A. M. Pasichnyk, and V. P. Buhaiets, “Physical and material science bases of increasing the efficiency of armor penetration by cumulative charges,” *Hydrodynamics and Acoustics*, vol. 3(93), no. 1, pp. 16–31, 2024. <https://doi.org/10.15407/jha2024.01.016>
- [9] W. P. Walters, W. J. Flis, and P. C. Chou, “A survey of shaped-charge jet penetration models,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 7, no. 3, pp. 307–325, 1988. [https://doi.org/10.1016/0734-743x\(88\)90032-2](https://doi.org/10.1016/0734-743x(88)90032-2)
- [10] B. V. Rumyantsev and V. Y. Klimenko, “Phase transformations in copper cumulative jet penetrating into silicon carbide,” *Technical Physics Letters*, vol. 37, no. 11, pp. 1030–1033, 2011. <https://doi.org/10.1134/s1063785011110113>
- [11] 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. <https://doi.org/10.1007/bf02699373>
- [12] B. H. Chang, J. P. Yin, Z. Q. Cui, and T. X. Liu, “Improved dynamic mechanical properties of modified PTFE jet penetrating charge with shell,” *Strength of Materials*, vol. 48, pp. 82–89, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11223-016-9741-8>
- [13] A. Elbeih, T. Elshenawy, S. Zeman, and Z. Akstein, “Application of BCHMX in shaped charges against RHA targets compared to different nitramine explosives,” *Central European Journal of Energetic Materials*, vol. 15, no. 1, pp. 3–17, 2018. <https://doi.org/10.22211/cejem/81604>
- [14] W. Walters, W. Gooch, and M. Burkins, “The penetration resistance of a titanium alloy against jets from tantalum shaped charge liners,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 26, no. 1–10, pp. 823–830, 2001. [https://doi.org/10.1016/s0734-743x\(01\)00135-x](https://doi.org/10.1016/s0734-743x(01)00135-x)

ЛІТЕРАТУРА

- [1] On the influence of the liner shape and charge detonation scheme on the kinetic characteristics of shaped charge jets and explosively formed penetrators / Voitenko Y., Sydorenko Y., Zakusylo R., Goshovskii S., Zaichenko S., and Boyko V. // *Central European Journal of Energetic Materials*. — 2023. — Vol. 20, no. 4. — P. 417–442.

- [2] Influence of liner form and explosive on the velocity and mechanical action of a shaped-charge jet / Voitenko Y., Sydorenko Y., Zakusylo R., Boyko V., Artemiev O., Bugaiets V., and Zakusylo D. // Central European Journal of Energetic Materials. — 2024. — Vol. 21, no. 3. — P. 320–327.
- [3] 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. 12–25.
- [4] Физика взрыва: том 2 / Баум Ф. А., Орленко Л. П., Станюкович К. П. и Шехтер Б. И. ; под ред. Орленко Л. П. — Москва : Физматлит, 2004. — 650 с.
- [5] Баланкин А. С. Физика проникания кумулятивной струи в пористые среды // Физика горения и взрыва. — 1989. — Т. 25, № 4. — С. 130–140.
- [6] Walters W. Introduction to shaped charges. — Aberdeen Proving Ground, MD : Army Research Laboratory, 2007. — 110 p.
- [7] Войтенко Ю. И., Бугаец В. П. Влияние алюминия на ударные свойства композитных кумулятивных струй // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво». — 2016. — № 30. — С. 36–48.
- [8] Фізичні та матеріалознавчі основи підвищення ефективності бронепробиття кумулятивними зарядами / Войтенко Ю. І., Сидоренко Ю. М., Бойко В. В., Ган А. Л., Пасічник А. М. і Бугаєць В. П. // Гідродинаміка і акустика. — 2024. — Т. 3(93), № 1. — С. 16–31.
- [9] Walters W. P., Flis W. J., Chou P. C. A survey of shaped-charge jet penetration models // International Journal of Impact Engineering. — 1988. — Vol. 7, no. 3. — P. 307–325.
- [10] Румянцев Б. В., Клименко В. Ю. Фазовые превращения в медной кумулятивной струе при внедрении в карбид кремния // Письма в журнал технической физики. — 2011. — Т. 37, № 21. — С. 87–94.
- [11] Trishin Y. A., Kinelovskii S. A. Effect of porosity on shaped-charge flow // Combustion, Explosion, and Shock Waves. — 2000. — Vol. 36, no. 2. — P. 272–281.
- [12] Improved dynamic mechanical properties of modified PTFE jet penetrating charge with shell / Chang B. H., Yin J. P., Cui Z. Q., and Liu T. X. // Strength of Materials. — 2016. — Vol. 48. — P. 82–89.
- [13] Application of BCHMX in shaped charges against RHA targets compared to different nitramine explosives / Elbeih A., Elshenawy T., Zeman S., and Akstein Z. // Central European Journal of Energetic Materials. — 2018. — Vol. 15, no. 1. — P. 3–17.
- [14] Walters W., Gooch W., Burkins M. The penetration resistance of a titanium alloy against jets from tantalum shaped charge liners // International Journal of Impact Engineering. — 2001. — Vol. 26, no. 1–10. — P. 823–830.

Yu. I. Voitenko, O. Yu. Voitenko, A. M. Pasichnyk

On the caliber of the shaped charge and the state of matter in the impact center when penetrating a dense barrier

The investigation is aimed at determining the basic parameters of the functioning of shaped charges. This is the velocity of the leading part of the shaped charge jet (CSJ), the strength and the density of its material, and the required charge caliber for guaranteed penetration of the solid barriers of the limited size for two liners of a conical shape, which are used often in products of civil and military significance. Following the results of investigations of the author and other predecessors were obtained the dependences of the velocity of the copper shaped charge jet on the detonation velocity of the explosive was obtained of the explosive materials based on RDX and HMX, which are close to linear for two angles of the liners at the tops of 42° and 50°. In the first place, it is possible to move into the area of explosives with lower and higher detonation velocities using the method of their development for the design of charges of different purposes. The main models of penetration of gradient-shaped charge jets are analyzed from the point of view of the possibility of their properties for engineering assessment of the caliber of the shaped charge required for guaranteed piercing of the solid barriers. To assess the depth of penetration of CSJ has been used formulas are based on the A-V model. The results of the study can be used for defining the required caliber of the shaped charge from various explosives with two forms of liners. Attention is drawn to the state of substances in the zone of interaction between the shaped charge jet and the solid barrier.

KEY WORDS: *shaped charge, detonation, liner, shaped-charge jets, charge caliber*