

*І.О. Толкунов, к.т.н., доцент, нач. кафедри, НУЦЗУ,  
О.М. Смирнов, ст. викладач, НУЦЗУ*

## **ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ КУМУЛЯТИВНИХ ЗАРЯДІВ**

(представлено д.т.н. Соловйом В.В.)

На підставі порівняльного аналізу способів та засобів, що використовуються при виконанні завдань в ході аварійно-рятувальних та інших невідкладних робіт вибуховим способом, визначені передумови використання того чи іншого типу зарядів вибухових речовин при виконанні цих робіт, запропонований наближений метод розрахунку параметрів кумулятивного заряду та струменя, який дозволяє визначити їх основні параметри та обґрунтувати доцільність та необхідність використання кумулятивних зарядів в певних умовах їх застосування.

**Ключові слова:** надзвичайна ситуація, вибухова речовина, кумулятивний заряд, кумулятивний струмінь, вибухонебезпечний предмет.

**Постановка проблеми.** Надзвичайні ситуації (НС), незалежно від характеру і причин їх виникнення, породжують складні інженерні завдання, пов'язані з виконанням великих обсягів аварійно-рятувальних та інших невідкладних робіт (АРІНР). Складність, небезпека та обмежені терміни їх виконання визначають необхідність широкого використання енергії вибуху, яка здатна швидко виконати великий обсяг АРІНР і тим самим створити сприятливі умови для скорочення загальних термінів та собівартості робіт. Необхідність і доцільність застосування вибуху в НС у багатьох випадках викликані потребою швидкого переміщення вибухом великих мас ґрунту, скельних порід, льоду або снігу, наприклад, для зведення сельзахисних гребель, захисних дамб та каналів при повенях, для влаштування котлованів і ровів для збору шкідливих і небезпечних хімічних речовин при аваріях на підприємствах нафтової і хімічної промисловості, для розчищення снігових завалів, крижаних заторів та ін. Вибухові роботи доцільно також застосовувати при обваленні аварійних будівель та споруд, руйнуванні елементів конструкцій з різних матеріалів, при знищенні вибухонебезпечних предметів (ВНП), виявлених в ході очищення місцевості, при ліквідації НС.

Спеціальні вибухові роботи проводяться в НС, як правило, в складних умовах. Через відсутність достовірних даних про реальний стан аварійних об'єктів і непередбачуваність розвитку обстановки вони стануть підвищену небезпеку. Тому виконання вибухових робіт вимагає створення надійної системи застосування вибуху в надзвичайних ситуаціях з комплексним урахуванням особливостей конкретної технології та безпеки робіт. Для забезпечення повної безпеки для людей і об'єктів, що

охороняються, необхідно проектувати і ретельно відпрацьовувати безпечну технологію виробництва вибухових робіт, які повинні виконуватися в суворій відповідності до вимог «Єдиних правил безпеки при вибухових роботах» [1], а також розробленої, погодженої та затвердженої проектною документації. Вона включає вибір раціональних та ефективних параметрів технології виробництва, прогноз впливу ударних і сейсмічних хвиль вибуху і дальності розльоту фрагментів конструкцій, що підриваються, розробку способів і заходів по зниженню шкідливих ефектів вибухів та їх локалізацію.

З іншого боку, постає нагальна потреба щодо підвищення ефективності використання вибухових матеріалів (ВМ), оскільки промисловістю України вони майже не виробляються, що в свою чергу породжує складну науково-технічну проблему, яка полягає у розробці та удосконаленні технологій, які дозволяють б виконувати максимальні об'єми робіт при мінімальних витратах ВМ, тому проведення досліджень в цій сфері є своєчасним і актуальним.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На теперішній час по вибуховим технологіям наявна достатньо велика кількість літературних джерел та досліджень, які охоплюють питання підривних робіт в будівництві, в гірничій та військовій справі [2-8]. Однак практично відсутня література по використанню вибухових технологій при проведенні АРІНР.

В залежності від засобів, що застосовуються для проведення підривних робіт, розрізняють наступні способи підривання зарядів: вогневий, електровогневий, електричний та детонуючим шнуром. Перші три можуть застосовуватися самостійно. Підривання детонуючим шнуром виконується спільно з вогневим або електричним способами. Підривання електровогневим способом є різновидом вогневого. При цьому способі детонація зарядів вибухової речовини (ВР) здійснюється підривом капсулів-детонаторів, а займання вогнепровідного шнура – за допомогою спалаху (від електричного струму) порохового заряду [9-11]. В залежності від послідовності підривання окремих зарядів або їх груп розрізняють миттєве, короткоуповільнене і уповільнене підривання. Класифікація та порівняльний аналіз способів та засобів, що використовуються при вирішенні складних інженерно-технічних завдань в ході АРІНР із застосуванням енергії вибуху, які достатньо широко описані в сучасній літературі, наведений в табл. 1.

В залежності від форми, величини і способу розміщення зарядів по відношенню до об'єкту, що руйнується, розрізняють наступні методи вибухових робіт: зовнішні, в т.ч. кумулятивні, шпурові, котлові, камерні, свердловинні і плоскі, а також комбіновані.

**Табл. 1. Класифікація і порівняльний аналіз способів та засобів, що використовуються при проведенні підричних робіт в ході АРІНР**

Спосіб підривання зарядів	Характеристика способу	Засоби, що застосовуються	Умови застосування
<i>по засобах підриву, що застосовуються</i>			
Вогневий	Заряд детонує від капсуля-детонатора (КД), який отримує початковий імпульс від іскри порохової серцевини вогнепровідного шнура (ВШ), що горить	КД, ВШ та засоби його запалювання (запалювальний гніт, сірники, ВШ з насічками, що горить	На відкритих та підземних розробках при подрібненні негабариту; при підричних роботах на кар'єрах та в шахтах, кім шахт небезпечних по газу і пилу; при криголамних роботах
Електровогневий	Заряд детонує від КД, а ВШ запалюється від електрозапальника	КД, ВШ та засоби його запалювання	При проходженні виробок, шурфів та камер
Електричний	Заряд детонує від електродетонатора (ЕД)	ЕД, дроти, джерела електричного струму та контрольно-вимірювальна апаратура	Основний спосіб підривання в шахтах, небезпечних по газу і пилу; при проходженні виробок; при підриванні свердловинних зарядів; при знищенні ВВП; при проведенні АРІНР
Детонуючим шнуром	Заряд детонує від детонуючого шнура (ДШ), який отримує початковий імпульс від КД або ЕД	ДШ, КД або ЕД	Основний спосіб при підриванні свердловинних зарядів на кар'єрах, при проведенні АРІНР
<i>по послідовності підривання окремих зарядів ВР</i>			
Миттєве підривання	Підривання групи зарядів відбувається практично миттєво	ДШ або ЕД миттєвої дії	В комбінації із короткоуповільненим підриванням при багаторядному підриванні
Короткоуповільнене підривання	Заряди підриваються із визначеним інтервалом 10...25 мс – 150...200 мс	ЕД короткоуповільненої дії та уповільнювачі з ДШ короткоуповільненої дії	Самий розповсюджений спосіб підривання при проведенні АРІНР
Уповільнене підривання	Заряди підриваються із визначеним інтервалом 0,15...0,2 с – 2 с і більше	ЕД короткоуповільненої дії	При проходженні виробок

При зовнішньому методі заряди ВР торкаються з об'єктом, що руйнується, тільки по поверхні, наслідок чого – маємо високу витрату ВР,

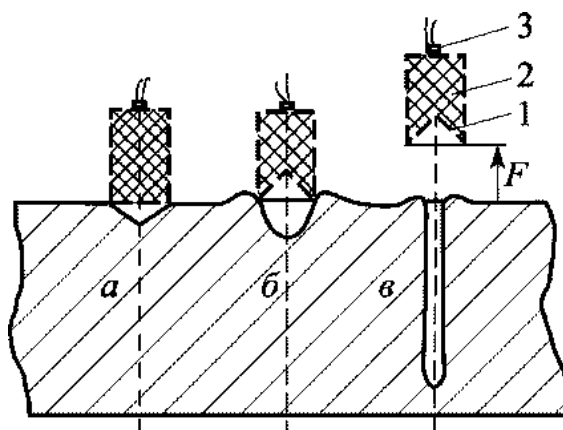
значно більшу, ніж при розміщенні заряду всередині об'єкта. При АРІНР цей метод застосовується для пробивання отворів в перешкодах з різних матеріалів, дроблення валунів, великих каменів (негабариту), перебивання і розчленування елементів різних конструкцій.

При використанні методу шпурових зарядів, їх розміщують всередині об'єкта, що підривається, в шпурах – циліндричних заглибленнях, що мають глибину до 4...5 м при діаметрі не більше 75 мм. Шпуровий метод застосовується як на відкритих, так і на підземних розробках. На відкритих використовується для дроблення фундаментів і стін з цегли, каменю, бетону та залізобетону відразу на всю висоту не більше 2 м або пошарово. Під землею шпуровий метод є основним. У твердих породах шпури бурять пневматичним і електричним перфораторами або ручними свердлами і молотками, в м'яких породах – пневмосвердлами, електросвердлами або ручними земляними бурами. Цей спосіб застосовують для зниження витрати ВР при наявності достатньої кількості сил, часу і відповідного бурового інструменту.

Якщо використовується метод свердловинних зарядів, їх розміщують в циліндричних заглибленнях (свердловинах) діаметром понад 75 мм при глибині до 5 м або свердловинах будь-якого діаметра при глибині більше 5 м. Залежно від технологічних особливостей проведення підривних робіт використовують вертикальні, похилі або горизонтальні свердловинні заряди, що розміщуються в один або кілька рядів. При вибуховому відбиванні ґрунтів найбільшого поширення набули вертикальні і похилі заряди.

Метод котлових зарядів застосовується переважно на відкритих розробках і лише в окремих випадках – під землею. У першому варіанті прострілювання шпурів використовують при відбиванні уступів невеликої висоти. Метод котлових зарядів з прострілюванням свердловин найчастіше застосовують тоді, коли опір по підшві уступу занадто великий для звичайного заряду (при невеликому куті укосу і значній висоті уступу). Шпури створюються за допомогою мотоперфораторів або так званих кумулятивних зарядів. Кумулятивний заряд (КЗ) є вибуховим пристроєм, що має велике значення в практиці застосування ВР як для військових, так і для промислових цілей.

Суть кумулятивного ефекту ілюструє рис. 1. Такий заряд складається з вибухової речовини (2), в якій сформовано кумулятивну виїмку – КВ (1), і детонатора (3). Якщо зосереджений монолітний заряд ВР, що має осьову симетрію, при вибуху на поверхні сталевого блоку залишає лише неглибоку конічну вм'ятину (рис. 1, а), то заряд з конічною виїмкою, що містить до того ж меншу кількість ВР, вибиває кратер, глибина якого в 5 разів більше (рис. 1, б). Коли в тому же заряді виїмка облицьована металом, а заряд вибухає на деякій відстані від перешкоди, (рівному 1...6 діаметрам заряду), утворюється значний отвір, глибиною до 12 діаметрів заряду (рис. 1, а).



**Рис. 1.** Ілюстрація суті кумулятивного ефекту при підриві КЗ в порівнянні з вибухом заряду ВР іншого типу: 1 - кумулятивна виїмка; 2 - заряд ВР; 3 - детонатор

Кумуляція уявляє собою істотне підвищення дії вибуху в певному напрямку. Цей ефект досягається завдяки концентрації енергії в одиниці об'єму в потрібному напрямку. Кумуляція енергії може здійснюватися різними способами. Класичним прикладом цього явища можуть служити збіжні сферичні ударні і детонаційні хвилі. У цьому випадку в центрі симетрії виникають тиски порядку мільйона атмосфер. Найчастіше в практиці використовується вісьосиметричний вид кумуляції. Цей ефект утворюється при використанні зарядів, що мають на одному зі своїх кінців кумулятивну виїмку. Ефект різко зростає, якщо ця виїмка покрита металевим облицюванням. Ініціювання кумулятивного заряду здійснюється з боку, протилежного кумулятивній виїмці.

Теоретичні дослідження й сучасні експериментальні методи (імпульсна рентгенографія, оптичні й осцилографічні методи й ін.) дозволили одержати досить повну уяву про процеси утворення кумулятивного струменя (КС).

Фронт детонаційної хвилі в КЗ починає поширюватися від детонатора зі швидкістю  $D$  (рис. 2). Потім він відбивається від поверхні виїмки, на яку при цьому діє максимальний тиск в 20...60 ГПа. Його величина залежить від матеріалу облицювання виїмки, кута підходу фронту детонаційної хвилі до поверхні облицювання і властивостей ВР.

Розігнана продуктами детонації тонка металева воронка рухається зі швидкістю 1...2,5 км/с до осі КЗ, що супроводжується послідовним зменшенням її діаметра в різних перетинах. У струмінь переходить внутрішня частина облицювання кумулятивної виїмки.

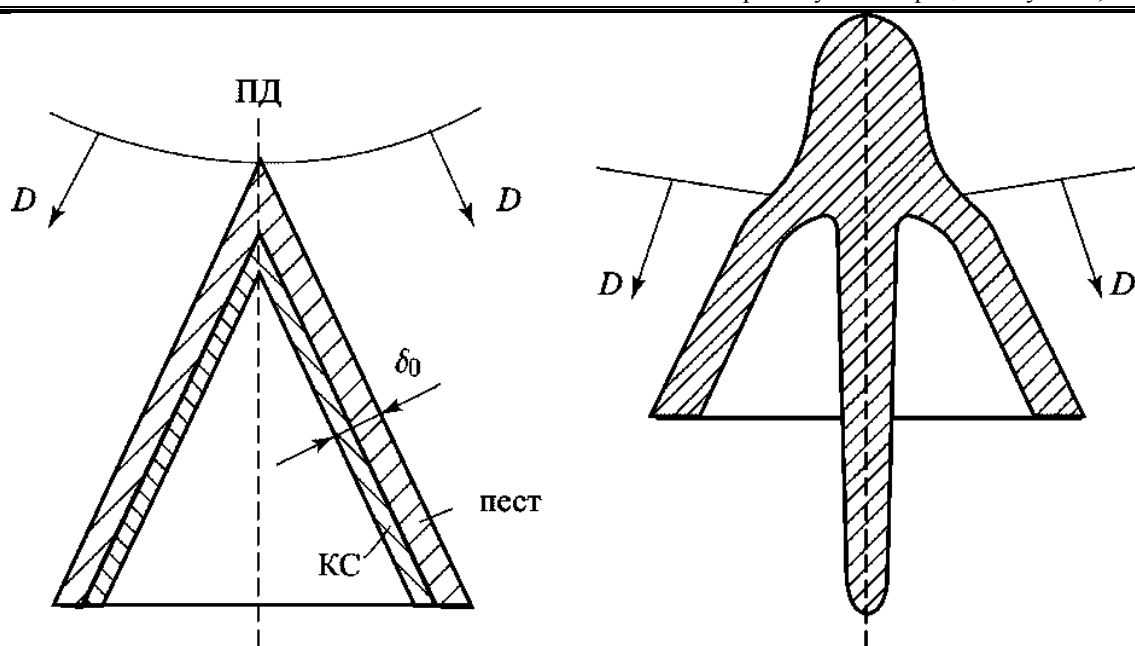


Рис. 2. Схема формування кумулятивного струменя при вибуху заряду вибухової речовини

Після схлопування кожна частка КС перебуває під всебічним тиском (крім внутрішньої поверхні), що виникає від зіткнення кумулятивної воронки по осі заряду. У результаті утворюється тонкий металевий струмінь діаметром  $d_c$ , що рухається уздовж осі заряду. Струмінь поступово розтягується і відділяється від основної маси тіла воронки, що називається пестом. Різні частини КС летять із різною швидкістю, оскільки верхні елементи кумулятивного конуса, товщиною  $\Delta x_i$  мають невеликий радіус і малу масу  $M_i$  у порівнянні з масою елементів у підставі конуса, а маса  $W_P$ , що прилягає до різних елементів виїмки  $t_i$ , в основному і визначає його швидкість, збуває від вершини до підстави конуса. Розподіл швидкості часток уздовж КС показано на рис 3. Головні частки (для  $Cu$ ,  $Fe$ ,  $Al$ ) мають швидкість  $V_c = 6 \dots 12$  км/с, а хвостові  $V_x = 0,5 \dots 1$  км/с.

Через градієнт швидкості струмінь згодом розтягується й розривається на кілька десятків часток (при вільному польоті в повітрі, порожнечі), кожна з яких летить як ціле тіло з постійною швидкістю.

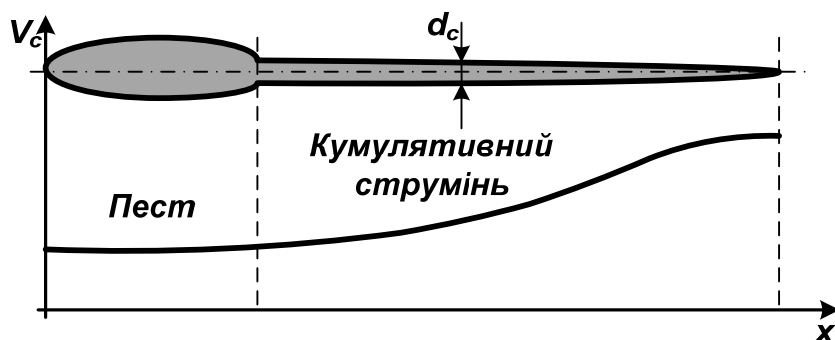


Рис. 3. Розподіл швидкості часток уздовж кумулятивного струменя

Облицювання кумулятивної виїмки виготовляють із різних матеріалів залежно від того завдання, що повинен вирішити КЗ. Широко використовуються важкі, пластичні метали, такі як мідь (марки М1), які утворюють суцільні струмені з більшим подовженням (приблизно в 10 разів); щільність у струмені знижується не більше ніж на 10% у порівнянні із щільністю вихідного матеріалу. Розрив цих струменів відбувається на відносно більших відстанях від місця їхнього утворення.

Кумулятивні струмені з таких металів, як залізо або маловуглецева сталь, цинк, раніше розриваються, менше розтягуються й проникають у перешкоду на меншу величину в порівнянні з мідними струменями.

Малопластичні, крихкі метали (титан, вольфрам й ін.) не утворюють суцільних струменів. У цьому випадку відразу формується струмінь із окремих часток відносно великого діаметра. Такі дискретні струмені проникають на меншу глибину, чим суцільні струмені, але, як правило, утворюють у перешкоді отвір більшого діаметра.

Для отримання КС без песта широко використовуються кумулятивні виїмки, пресовані з вольфрамового порошку (до 75%) і мідного порошку з додаванням сполучних добавок. Порошкові струмені не розриваються на частки, як, наприклад, мідні струмені, але при розтягуванні їхня щільність зменшується. КЗ із такими виїмками здатні пробити маловуглецеву сталеву плиту товщиною  $12d$  (де  $d$  – діаметр заряду ВР).

Дослідження показують, що температура КС нижче температури плавлення: для таких матеріалів, як мідь і залізо, вона дорівнює  $600 \dots 1000^\circ\text{C}$ . Нагрівання КС залежить від декількох причин: 1) при взаємодії детонаційної хвилі з облицюванням в останньому виникають ударні хвилі, потім відбувається ізоентропічне розвантаження, причому облицювання нагрівається до  $150 \dots 200^\circ\text{C}$  внаслідок необоротних втрат на фронті ударної хвилі; 2) нагрівання ще на  $400 \dots 700^\circ\text{C}$  досягається за рахунок пластичного деформування металу виїмки і струменю; 3) нагрівання від взаємодії струменя з повітрям і від взаємодії облицювання із продуктами детонації за рахунок теплопровідності.

Кумулятивний ефект відомий досить давно. Так, у Росії військовий інженер М.М. Боресков використав цей ефект ще в 1864 р. для руйнування гірських порід. У СРСР перші систематичні дослідження газової кумуляції проведені М.Я. Сухаревським в 1923-1926 р.р. Перші кумулятивні боєприпаси з металевою лійкою були створені в період другої світової війни (1939-1945 р.р.) у СРСР і Німеччині. В сорокові роки ХХ століття вітчизняними й закордонними вченими (М.А. Лаврентьев, Г.И. Покровський, Г. Тейлор, Г. Біркхофф й ін.) була створена гідродинамічна теорія кумуляції. В основі цієї теорії лежать елементи теорії струменів нестисливої рідини.

Хоча явище кумуляції почало вивчатися досить давно, ще залишилися деякі технологічні та інженерно-технічні аспекти, які потребують подальшого дослідження, оскільки заряди вибухових речовин, що мають

кумулятивну виїмку все ширше використовуються в різних галузях, в тому числі і при проведенні аварійно-рятувальних та інших невідкладних робіт, які і будуть розглянуті в роботі.

**Постановка завдання та його вирішення.** Отже розглянемо наближений метод розрахунку параметрів кумулятивного струменя. Процеси детонації кумулятивного заряду, схлопування воронки і утворення кумулятивного струменя відносяться до класу двовимірних вісьосиметричних завдань.

На теперішній час існує декілька наближених (інженерних) методів розрахунку параметрів кумулятивних зарядів, які потребують подальшого удосконалення, один з яких буде розглянутий в роботі [12].

Весь кумулятивний заряд розбивається на  $n$  елементів,  $n \geq 10$  (рис. 4).

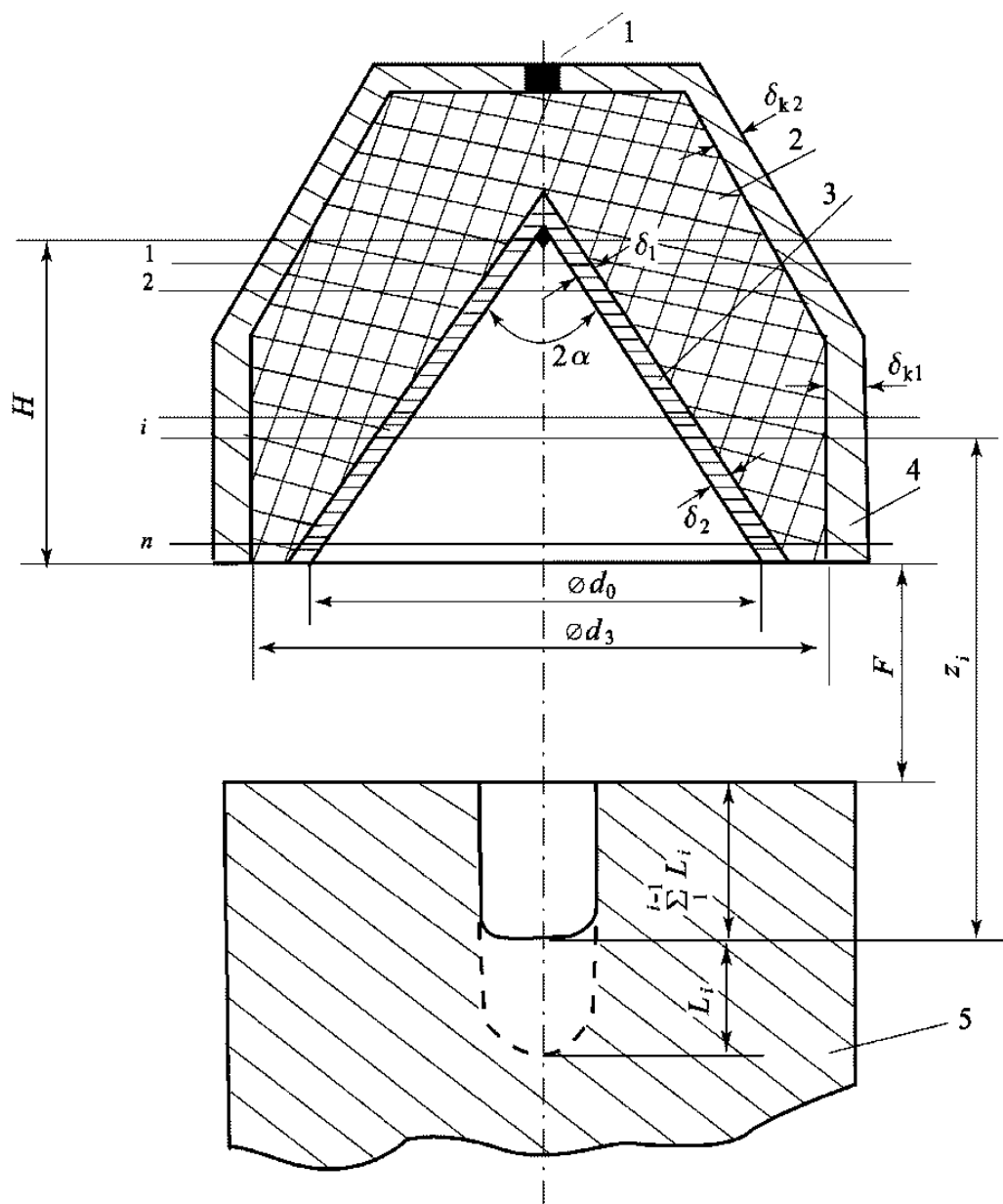


Рис. 4. Розрахункова схема кумулятивного заряду: 1 – детонатор; 2 – вибухова речовина; 3 – кумулятивна виїмка з облицюванням; 4 – корпус заряду; 5 – перешкода, що пробивається



Розраховується частина заряду висотою  $H$ .

Розглянемо  $i$ -й елемент заряду, поміщений у корпус, масою  $M_{Hi}$ , де маса ВР  $i$ -го елемента  $m_i$ , а маса кумулятивного облицювання  $M_i$  (рис. 5).

Для даної схеми запишемо рівняння збереження енергії

$$\frac{M_i U_{Bi}^2}{2} + \frac{m_{ai} U_{Bi}^2}{24} = m_{ai} Q, \quad (1)$$

де  $M_i$  – маса кумулятивного облицювання, кг;  $U_{Bi}^2$  – швидкість, з якою переміщується в просторі  $i$ -й елемент заряду, м/с;  $m_{ai}$  – активна маса ВР, кг;  $Q$  – кінетична енергія руху елементів виїмки та газів, Дж.

З рівняння (1) видно, що енергія активної маси ВР  $m_{ai}$  перетвориться в кінетичну енергію руху елементів виїмки та у кінетичну енергію руху газів, що утворяться при вибуху активної маси ВР.

Активна маса розраховується по наступному співвідношенню

$$m_{ai} = \frac{m_i}{2} \left( 1 + \frac{M_{Hi} - M_i}{M_{Hi} + M_i + m_i} \right), \quad (2)$$

де  $M_{Hi}$  – маса  $i$ -ого елемента заряду, поміщеного у корпус, кг.

Розглянемо деякі випадки навантаження, що впливають із (2)

1.  $M_{Hi} = M_i$ ;  $m_{ai} = \frac{m_i}{2}$ ;
2.  $M_{Hi} \gg M_i$ ;  $m_{ai} \cong m_i$ ;
3.  $M_{Hi} = 0$ ;  $m_{ai} = \frac{m_i^2}{2(M_i + m_i)}$ .

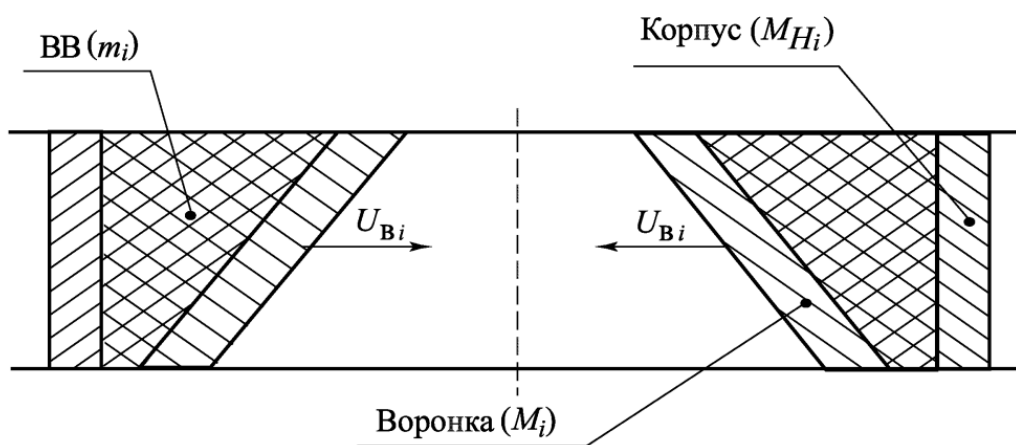


Рис. 5. Схема  $i$ -ого елемента заряду, поміщеного у корпус, масою  $M_{Hi}$

Позначимо:  $B_i = \frac{m_{ai}}{M_i}$ , де  $\beta_i$  – коефіцієнт навантаження  $i$ -го елемента. Відомо, що  $D = 4\sqrt{Q}$ , де  $D$  – швидкість детонації ВР. Рівняння (1) перетворимо до наступного виду

$$U_{Bi} = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{B_i}{2+B_i}}. \quad (3)$$

Визначимо швидкість струменя для  $i$ -го елемента

$$U_{Ci} = \frac{U_{Bi}}{\operatorname{tg} \frac{\beta_i}{2}} = \frac{U_{Bi}}{2 \operatorname{tg} \frac{\beta_i}{2}} \sqrt{\frac{B_i}{2+B_i}}. \quad (4)$$

Значення кута  $\alpha_i$  уздовж облицювання змінюється, у процесі зіткнення воронки схлопування від вершини до підстави із кутом  $\alpha_i$ , що збільшується. Тобто, кут  $\alpha_i$  треба визначати конкретно для кожного  $i$ -го елемента облицювання.

З огляду на те, що процес детонації має кінцеву швидкість  $D$ , крапка  $a$  протягом часу  $\Delta t_i = \Delta x_i / D$  буде рухатися, а крапка  $b$  ще буде нерухомою (рис. 6). Виникає перекид та зміна кута  $\alpha_i$ .

Величина  $\Delta x_i$  задана розподілом заряду на елементи, лінія  $ab$  – початкове положення утворюючої воронки. Згідно рис. 6

$$\begin{aligned} a'd &= cb = a'a + ad; \\ a'a &= \bar{U}_i \Delta t_i; \\ ad &= \operatorname{tg} \alpha_{0i} \Delta x_i. \end{aligned}$$

Крапка  $a$  лежить на межі  $i$ -го та  $(i-1)$ -го елементів, тому її швидкість можна визначити як напівсуму швидкостей цих елементів

$$\bar{U}_i = \frac{U_{0i-1} + U_{0i}}{2}. \quad (5)$$

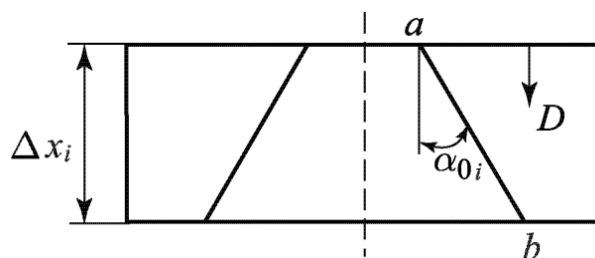


Рис. 6. Схема початкового положення утворюючої воронки

Для даного етапу можна визначити кут  $\alpha_{1i}$  (рис. 7)

$$\operatorname{tg} \beta_{1i} = \frac{cb}{\Delta x_i} = \frac{\bar{U}_i \Delta t_i + \operatorname{tg} \beta_{0i} \Delta x_i}{\Delta x_i} = \frac{\bar{U}_i}{D} + \operatorname{tg} \beta_{0i}. \quad (6)$$

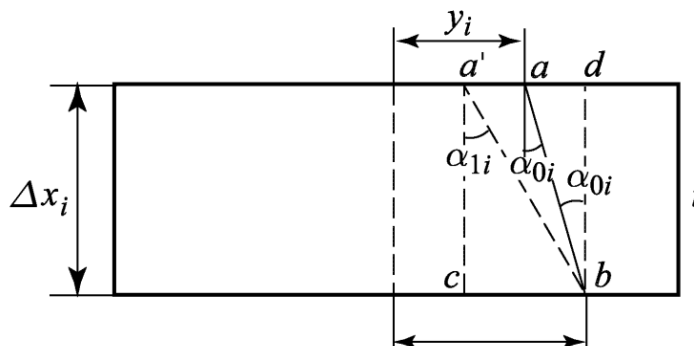


Рис. 7. Схема зміни кута нахилу воронки при вибуху

Кут нахилу лінії  $a'b$  додатково зміниться, коли точка  $b$  почне рухатися, тому що точки  $a'$  і  $b$  будуть мати різні швидкості. Позначимо:  $t_i$  – час, протягом якого точка  $a'$  переміститься в точку  $a''$  (рис. 8) та визначимо цей час, використовуючи вираз

$$t_i = \frac{y_i - \bar{U}_i \Delta t_i}{\bar{U}_i}. \quad (7)$$

Тангенс цього кута визначається з рівняння

$$\operatorname{tg} \beta_i = \frac{\bar{U}_{i+1}}{\Delta x_i},$$

де  $\bar{U}_{i+1} = \frac{U_{Bi} + U_{0i+1}}{2}.$

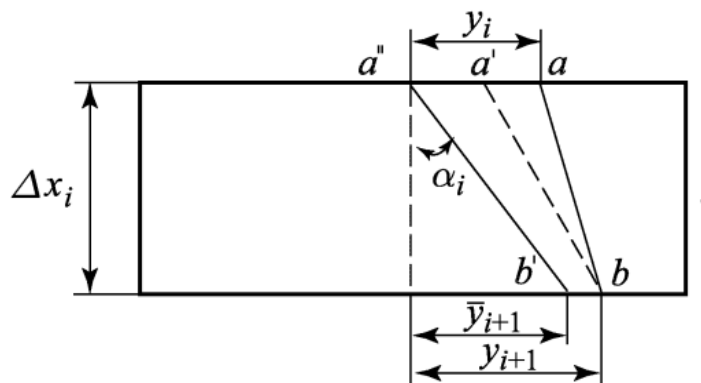


Рис. 8. Схема подальшої зміни кута нахилу воронки при вибуху

Необхідно визначити величину  $\bar{y}_{i+1}$  (рис. 8)

$$y_{i+1} - \bar{y}_{i+1} = \bar{U}_{i+21} t_i,$$

де 
$$\bar{U}_{i+21} = \frac{U_{Bi} + U_{i+21}}{2}.$$

З урахуванням (7), звідси одержимо

$$\bar{y}_{i+1} = y_{i+1} - \bar{U}_{i+1} \frac{y_i - \bar{U}_i \Delta t_i}{\bar{U}_i}. \quad (8)$$

Остаточно на основі (8) будемо мати

$$\operatorname{tg} \beta_i = \frac{y_{i+1}}{\Delta x_i} - \frac{\bar{U}_{i+1}}{\Delta x_i} \left( \frac{y_i - \bar{U}_i \Delta t_i}{\bar{U}_i} \right), \quad (9)$$

де 
$$\Delta t_i = \frac{\Delta x_i}{D}.$$

Формула (9) визначає дійсний кут схлопування облицювання для  $i$ -го елемента кумулятивного облицювання.

Маса кумулятивного струменя визначається за допомогою формули (5), якщо  $m_1 = M_{Ci}$ ,  $m_0 = M_i$ , а її кінетична енергія – за допомогою (4)

$$M_{Ci} = M_i \sin^2 \frac{\beta_i}{2}; \quad M_{KC} = \sum_{i=1}^n M_{Ci} \quad (10)$$

$$E_{Ci} = \frac{M_{Ci} U_{Ci}^2}{2}; \quad E_{KC} = \sum_{i=1}^n E_{Ci}; \quad z = \frac{E_{KC}}{mQ}$$

Показник  $\eta$  характеризує ККД кумулятивного заряду. Кут  $\alpha_i$  визначається по формулі (9).

Діаметр  $i$ -го елемента кумулятивного струменя визначається з формули

$$M_{Ci} = \frac{\pi d_{Ci}^3}{4} l_i \rho.$$

Звідси визначаємо, що

$$d_{Ci} = \sqrt[3]{\frac{4M_{Ci}}{\rho l_i c_i}}, \quad (11)$$

тобто  $d_{Ci}$  залежить від глибини проникнення КС в перешкоду  $l_i$  (рис. 4).

Також розглянемо деякі конструктивні особливості КЗ:

**1. Форми облицювання кумулятивних воронки.** Залежно від характеру технічних завдань, що вирішуються за допомогою КЗ, використовуються кумулятивні облицювання різної форми. На рис. 9 представлені кумулятивні облицювання воронки різної форми, що використовуються на практиці. Найчастіше в КЗ використовуються найпростіші геометричні форми облицювань (рис. 9, а-д).

Циліндричні облицювання застосовують у тих випадках, коли треба отримати безградієнтний кумулятивний струмінь, у якого всі елементи мають постійну швидкість (рис. 9, а). Конічні облицювання використовують для отримання максимальної глибини пробиття перешкоди (рис. 9, б,к). Кут  $2\alpha$  звичайно змінюється в межах  $30^\circ \dots 60^\circ$ , оптимальні значення кута становлять  $40^\circ \dots 50^\circ$ .

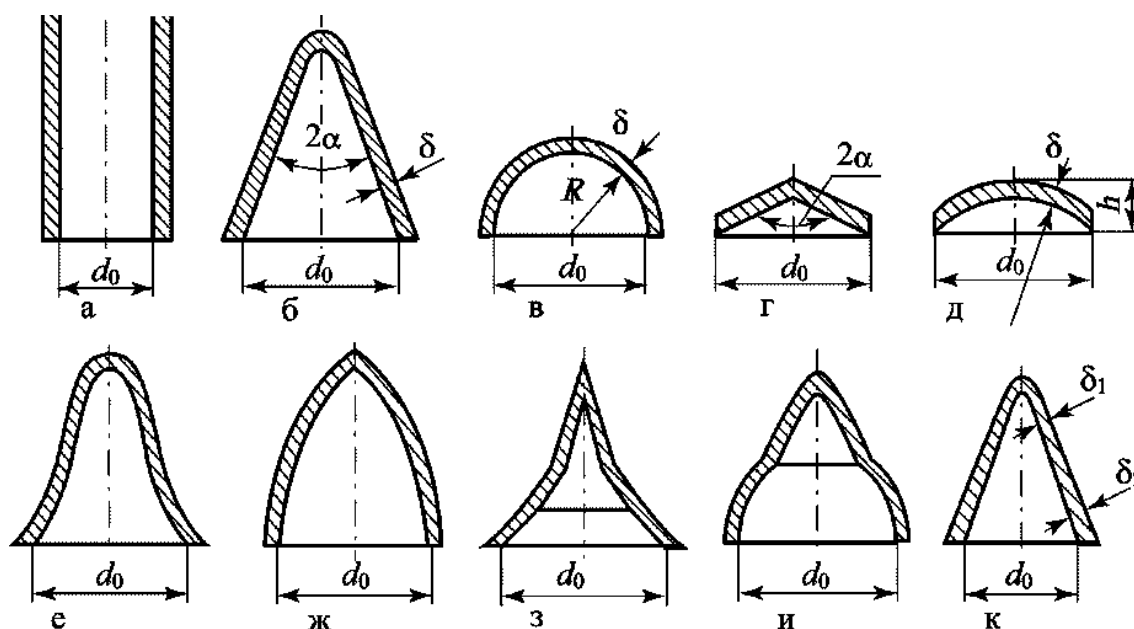


Рис. 9. Схематичне зображення кумулятивних облицювань воронки різної форми

В конічних облицюваннях часто використовують змінну товщину стінок облицювання (рис. 9, к). Це дозволяє збільшити градієнт швидкості та збільшити довжину кумулятивного струменя. Сферичні облицювання використовуються в тих випадках, коли треба отримати збільшений діаметр пробитого в перешкоді отвору, але при меншій глибині пробиття перешкоди в порівнянні з конічним облицюванням.

Облицювання з більшими кутами  $2\alpha = 130^\circ \dots 150^\circ$  або сферичні сегменти (рис. 9, г,д) використовуються не для утворення кумулятивного струменя, а для формування компактного тіла з облицювання, що називається

вається «ударним ядром». Швидкість ядра звичайно 2...3 км/с. Воно може вражати цілі на відстані до декількох десятків метрів.

Рупороподібні та тюльпаноподібні облицювання (рис. 9, е,ж), що мають криволінійні утворюючі форми воронки, розширюють можливості керування довжиною струменя. Їхній недолік – складність у виготовленні.

Для рішення специфічних завдань використовуються комбіновані облицювання (рис. 9, з,и).

**2. Застосування лінз.** Лінза збільшує ККД заряду, вона розвертає детонаційну хвилю на воронку. Без лінзи воронка обжимається дотичною детонаційною хвилею, а з лінзою – падаючою хвилею.

Лінзи звичайно мають циліндричну форму або форму усіченого конуса. Матеріалом для лінзи може бути пінопласт, текстоліт, дерево й т.п. Звичайно її товщина підбирається такою, щоб детонація не передавалася через лінзу. Основний шлях детонації повинен проходити в обхід лінзи збоку.

**3. Вибір фокусної відстані.** Для кумулятивних зарядів існує оптимальна відстань  $z = F$  від заряду до перешкоди, яка називається фокусною відстанню (рис. 1). При спрацьовуванні заряду на фокусній відстані бронепробиття максимальне в порівнянні з іншими варіантами. Для конічних зарядів звичайно  $F = (2...3)d$ , де  $d$  – діаметр ВР. Для прецизійних зарядів  $F = (6...10)d$ .

Наявність фокусної відстані пояснюється рядом причин: після схлопування елементів кумулятивної воронки і утворення елементів струменя, останні продовжують розтягуватися, і довжина струменя збільшується доти, доки не розривається на частини внаслідок наявності градієнта швидкості уздовж струменя. Тобто фокусна відстань  $F$  із цих міркувань повинна визначатися тією мінімальною відстанню заряду від перешкоди, при якому КС розтягується до свого граничного значення. Але таке визначення фокусної відстані справедливо для абсолютно точно виготовлених зарядів. У цьому випадку всі елементи не отримують бічних імпульсів і летять один за іншим точно по осі. У реальному заряді всі деталі КЗ виготовлені з певним допуском, і елементи струменя отримують бічні швидкості, у результаті струмінь переміщається не строго по вісі, а в деякому конусі. Ця обставина вимагає зменшення фокусної відстані у порівнянні з  $F$ , у протилежному випадку різні елементи будуть потрапляти в різні місця перешкоди, площа поразки збільшиться, а глибина пробиття буде зменшуватися. Тому реальна фокусна відстань менше, ніж  $F$ , і КС у цьому випадку частково пробиває перешкоду в розірваному стані, а частково в суцільному ще не розірваному вигляді. Залежність фокусної відстані від точності виготовлення заряду змушує визначати фокусну відстань експериментальним шляхом.

Коли відстань  $z > F$ , то глибина пробиття перешкоди зменшується. Це відбувається з тієї причини, що КС летить у рамках деякого конуса з певним кутом. Чим більше  $z$  – відстань КЗ від перешкоди – тим більше

поперечний переріз цього конуса. В результаті більше число елементів КС потрапляє в перешкоду не по вісі КС, що веде до зменшення величини  $L$  – глибини проникнення КС у перешкоду. При досить великих значеннях  $z$  всі елементи КС потрапляють у перешкоду не по вісі КС і глибина  $L$  дорівнює тій глибині, що пробиває окремий елемент.

**4. Залежність кумулятивних параметрів від технології та зборки заряду.** На дію КЗ значного впливу завдають технологічні фактори. До них у першу чергу належать:

а) точність виготовлення воронки і якість її матеріалу, її різностінність і співвісність із лінзою та зарядом ВР. Недостатньо точне виготовлення воронки приводить до того, що в кумулятивній швидкості з'являються складові швидкості, перпендикулярні до осі заряду, у результаті різні частини струменю розходяться у бік, і ефект дії зменшується;

б) неоднакова щільність ВР у перетинах, перпендикулярних осі заряду. Так, наприклад, при звичайному литті заряду ВР, у горизонтальних перетинах заряду сплавів типу ТГ детонація в різних крапках відрізняється на 150 м/с (або близько 2% від швидкості детонації), щільність ВР у 3-5% дорівнює 1,675...1,705 г/см<sup>3</sup>, а спеціальний вид вібраційного лиття дозволяє знизити розкид у швидкості детонації в горизонтальному перетині до 20 м/с (близько 0,3% від швидкості детонації), знизити щільність до 1-2% і збільшити щільність ВР до 1,78 г/см<sup>3</sup>;

в) розтовщеність ВР у перетинах, перпендикулярних осі заряду;

г) точність зборки всіх виробів: воронка, лінза, детонатор, зовнішня оболонка. Відхилення розмірів елементів реального виробу від осі повинне бути мінімальним. Глибина проникання кумулятивного струменя в сталеву перешкоду для прецизійної технології становить  $L = (8...10)d$ , у перспективі до  $12d$ , а для звичайної технології  $L = (3...5)d$ .

На рис. 10 представлені експериментальні дані залежності кута  $\gamma$  від точності виготовлення ряду параметрів КЗ. На цьому рисунку лінія 1 показує залежність кута  $\gamma$  від різностінності  $\Delta\delta$  воронки; лінія 2 – від різностінності  $\Delta\delta_{вр}$  шару ВР; лінія 3 – від зсуву точки ініціювання. Найбільшого впливу із цих трьох параметрів завдає різностінність кумулятивної воронки  $\Delta\delta$ . Отже, величина  $\gamma$  визначає рівень технології виготовлення КЗ.

Похибки в технології виготовлення впливають на глибину пробиття по-різному, тому допуски на окремі параметри істотно розрізняються. Так, допуск на різностінність облицювання може бути в 6 разів менше, ніж допуск на різностінність ВР і в 12 разів менше допуску на корпус КЗ.

Істотний вплив на величину  $L$  здійснює допуск на різнощільність ВР, розмір зерна мідних кумулятивних облицювань і неспіввісність облицювання та заряду ВР, а також зазори й перекося окремих елементів КЗ.

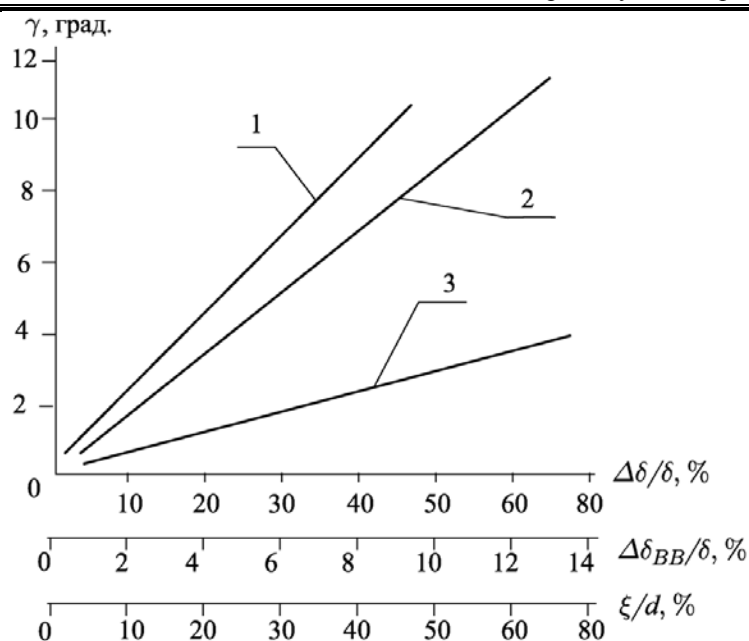


Рис. 10. Експериментальні дані залежності кута  $\gamma$  від точності виготовлення КЗ: 1 – залежність кута  $\gamma$  від різнистінності  $\Delta\delta$  воронки; 2 – залежність кута  $\gamma$  від різнистінності  $\Delta\delta_{ВВ}$  шару ВР; 3 – залежність кута  $\gamma$  від зсуву точки ініціювання

**Висновки.** Таким чином, в роботі проведений порівняльний аналіз способів та засобів, що використовуються при проведенні підричних робіт в ході АРІНР, визначені передумови використання того чи іншого типу зарядів ВР при виконанні цих робіт, запропонований наближений метод розрахунку параметрів кумулятивного заряду та струменя, який дозволяє визначити їх основні параметри та обґрунтувати доцільність та необхідність використання кумулятивних зарядів в певних умовах їх застосування.

Також розглянуто деякі конструктивні особливості кумулятивних зарядів, зокрема, форми облицювання кумулятивних воронки, порядок застосування лінз, вибір фокусної відстані та залежність кумулятивних параметрів від технології та зборки заряду, які завдають істотного впливу на якість виконання завдань щодо локалізації та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій із застосуванням енергії вибуху, зокрема, із використанням кумулятивних зарядів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Єдині правила безпеки при вибухових роботах: НПАОП 0.00-1.17-92. – [Чинний від 1992-03-25]. – Київ: Держспоживстандарт України, 1992. – 87 с. – (Національний стандарт України).
2. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. – 3-е изд., исправленное. – В 2-х т. – М.: Физматлит, 2004. – 1488 с.
3. Высокоскоростное взаимодействие тел / Под ред. В.М. Фомина. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 1999. – 600 с.
4. Ударные и детонационные волны. Методы исследования / [Кобылкин И.Ф., Селиванов В.В., Соловьев В.С., Сысоев Н.Н.]. – 2-ое изд., перераб. и дополн. – М.: Физматлит, 2004. – 367 с.
5. Ударные волны и экстремальные состояния вещества / Под ред.



В.Е. Фортова и др. – М.: Наука, 2000. – 425 с.

6. Свойства конденсированных веществ при высоких давлениях и температурах / Под ред. Р. Ф. Трунина. – Арзамас-16: Изд. ВНИИЭФ, 1992. – 398 с.

7. Высокоскоростные ударные явления / Под ред. В.Н. Николаевского. – М.: Мир, 1973. – 245 с.

8. Ударно-волновые явления в конденсированных средах / [Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортов В.Е.]. – М.: Яснук-К, 1996, – 407 с.

9. Смирнов О.М. Обґрунтування параметрів та визначення показників ефективності зарядів водостійких свердловинних «Вулкан-1» для відкритих підричних робіт / О.М. Смирнов, І.О. Толкунов. // Збірник наукових праць. Проблеми надзвичайних ситуацій. – Харків: НУЦЗУ, 2016. – Вип. № 24. – С.106-117.

10. Речовини вибухові промислові. Класифікація: СОУ МПП 71.100.30-131:2006. – Офіц. вид. – К.: Міністерство промислової політики України, 2006. – (Нормативний документ Міністерства промислової політики України. Наказ від 09.11.2006 р. №405).

11. Промышленные взрывчатые вещества на основе утилизированных боеприпасов: [учебное пособие для ВУЗов] / [Ю.Г. Щукин, Б.Н. Кутузов, Б.В. Мацевич, Ю.А. Татищев]; под общей ред. Ю.Г. Щукина. – М.: ОАО «Издательство «Недра», 1998. – 319 с.

12. Методика определения параметров взрывного устройства по разрушениям окружающей обстановки / Под ред. В.А. Химичева. – М.: НПО «Специальная техника и связь», 2002. – 106 с.

*Отримано редколлегією 05.10.2017*

И.А. Толкунов, О.Н. Смирнов

#### **Обоснование параметров и определение показателей эффективности кумулятивных зарядов**

На основании сравнительного анализа способов и средств, используемых при выполнении задач в ходе аварийно-спасательных и других неотложных работ взрывным способом, определены предварительные условия использования того или иного типа зарядов взрывчатых веществ при выполнении этих работ, предложен приближенный метод расчета параметров кумулятивного заряда и струи, который позволяет определить их основные параметры и обосновать целесообразность и необходимость использования кумулятивных зарядов в определенных условиях их применения.

**Ключевые слова:** чрезвычайная ситуация, взрывчатое вещество, кумулятивный заряд, кумулятивная струя, взрывоопасный предмет.

I.A. Tolkunov, O.N. Smirnov

#### **Substantiation of parameters and determination of cumulative charges efficiency indicators**

Based on a comparative analysis of the methods and means used to perform tasks during rescue and other urgent work by an explosive method, preliminary conditions for the use of one or another type of explosive charges are determined in the course of performing these works, an approximate method for calculating the parameters of a cumulative charge and a jet, which allows to determine their main parameters and to justify the expediency and necessity of using shaped charges in certain conditions of their application.

**Keywords:** emergency situation, explosive, cumulative charge, cumulative jet, explosive object.