

Ю.І. Войтенко, д.т.н.  
Український державний геологорозвідувальний інститут  
В.Г. Кравець, д.т.н., проф.  
А.Шукюров, аспір.  
А.Л. Ган, к.т.н.  
НТУУ «КПІ» ім. Ігоря Сікорського  
В.В. Корбійчук, к.т.н., доц.  
Житомирський державний технологічний університет

## Ефективність зарядів різних конструкцій при деформуванні та руйнуванні металевих перепон

*Представлено експериментальні дані та дано порівняння об'єму утвореного кратера в металі при вибухах циліндричних і конічних накладних зарядів, пристроїв кумулятивної дії різної конструкції з кількох вибухових речовин: кумулятивного заряду із суцільним облицюванням, кумулятивного заряду з пористим облицюванням, газокумулятивного заряду і пристрою спрямованої дії – вибухового генератора плазми. Показано, що за критерієм максимального об'єму утвореного кратера ефективність збільшується від вибухового генератора плазми до накладних, кумулятивних із суцільними та пористими облицюваннями і газокумулятивних зарядів. Найвищу ефективність мають кумулятивні заряди з облицюваннями із інтелектуальних матеріалів, які генерують при ударі кумулятивного струменя додаткову енергію в перепоні. Визначено шляхи вдосконалення зарядів різних конструкцій та перспективні матеріали для них за критерієм максимального об'єму кратера в мішені.*

**Ключові слова:** детонація; накладний заряд; кумулятивний заряд; кумулятивне облицювання; газокумулятивний заряд; об'єм кратера.

**Вступ.** Заряди вибухових речовин (ВР) різної конструкції використовуються в роботах при реконструкції будівельних і промислових об'єктів, при перфорації обсадних колон геологорозвідувальних і нафтогазових свердловин, у гірничому виробництві при контактних вибухах та в свердловинах для стабілізації детонації сумішевих ВР, у військовій та ракетно-космічній галузях, при високошвидкісному метанні твердих тіл, для отримання високоентальпійної плазми тощо [1–5]. Особливий інтерес представляють кумулятивні заряди з пористими облицюваннями, які масово використовуються в нафтогазовій галузі, а також у виробках військового призначення.

**Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** Одним із основних параметрів, що характеризують ефективність роботи заряду, вважається розмір воронки деформування, глибина та діаметр пробиття, або розмір зони дроблення в крихких матеріалах. У деяких практичних додатках, крім глибини пробиття або місцевого дроблення, має значення об'єм утвореного каналу і розмір зони руйнування та передруйнування матеріалу навколо каналу. У військовій справі має значення заперепонна дія заряду, яка залежить від кількості та швидкості виділення енергії в осередку взаємодії компактного вражаючого елемента або кумулятивного струменя з перепонною. У гірському виробництві накладні заряди різної конструкції використовують для дроблення негабариту, а також в якості бойовиків у свердловинних зарядах: каналні, що використовують принцип газокумулятивного заряду (ГКЗ); конічні та комбіновані [6].

Ефективність руйнування гірських порід щодо задачі проходки гірських виробок суцільними, кумулятивними і газокумулятивними зарядами досліджена в роботі [3]. Показано, що розмір області місцевого руйнування збільшується з ростом швидкості детонації та є максимальним у разі газокумулятивного вибуху. При цьому тонке облицювання циліндричної порожнини ГКЗ збільшує ефективність руйнування. Глибина кумулятивних отворів при підриванні зарядів гексогену з суцільним мідним кумулятивним облицюванням у граніті з міцністю на одновісний стиск  $\sim 200$  МПа становить  $(0,75-1) dc$  ( $dc$  – калібр заряду).

Дослідження кратероутворення в металевих перепонах вибуховим плазмовим генератором проведено в роботі [1]. Показано, що величина, обернена об'єму кратера, прямо пропорційна твердості матеріалу перепони за Брінеллем. Аналогічну залежність отримано авторами роботи [7] для кумулятивних зарядів із пористими алюмінієвими облицюваннями. У цій же роботі показано, що об'єм кратера в мішені із алюмінієвого сплаву на 44–48 % більший при ударі по мішені кумулятивним струменем (КС) із пористого Al, ніж із суцільного Al. Розмір кратера збільшується при змішуванні Al з міддю.

У роботі [8] проведено порівняння подрібнюючої дії конічних накладних зарядів амоніту №6 ЖВ і кумулятивних зарядів ЗКНКЗ-1000. Показано, що витрата ВР у першому випадку менше, ніж при використанні кумулятивних зарядів зі сталевим облицюванням. Це пов'язано в першу чергу з неповним контактом основи кумулятивного заряду з нерівною поверхнею гірської породи та ослабленням ударної хвилі при переході з ВР у гірську породу.

У роботі [9] викладено результати досліджень бризантної дії накладних зарядів амоніту № 6 ЖВ і гексогену слідовим методом. Показано, що поряд із оптимальним співвідношенням діаметра та висоти має значення оптимальна конічна форма заряду та точка ініціювання детонації заряду зверху.

Закономірності зміни об'єму кратера в пластичних матеріалах і зони дроблення у крихких матеріалах при вибухах зарядів різної конструкції вивчені недостатньо. Невизначено клас матеріалів, які можна вважати інтелектуальними та які посилюють ударні можливості композитних КС і компактних ударників. Тому є підстави вважати, що недостатня визначеність впливу конструкції вибухових пристроїв, швидкості детонації, інтелектуальних матеріалів для облицювань кумулятивних зарядів зумовлюють необхідність проведення досліджень в цьому напрямку.

**Мета та задачі дослідження.** Мета цієї роботи – порівняльний аналіз ефективності зарядів різної конструкції за критерієм максимального об'єму порожнини в перепоні та визначення шляхів подальшого їх удосконалення.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі задачі:

- визначити вплив конструкції заряду та швидкості детонації вибухової речовини на об'єм кратера в металічній перепоні;
- визначити особливості впливу інтелектуальних матеріалів у складі пористого облицювання кумулятивних зарядів на процес утворення кратера та його об'єм.

Для такого аналізу використовувалися експериментальні та розрахункові дані інших авторів [1, 7, 8, 10–12, 19–27], а також авторські результати досліджень.

**Матеріали та методи дослідження.** Експерименти з кумулятивними зарядами проводилися за відомою методикою [2]. Заряд гексогену масою 10 г, закритий кришкою, встановлювався безпосередньо на перепону, що складалася із сталевих пластин (Ст. 3) товщиною 10 мм, розташовану зверху і матеріалу основної перепони: сталь Ст. 3, алюмінієвий сплав АМЦ-н. Заряд підривався електродетонатором через відрізок детонуючого шнура. Відстань від заряду до першої перепони (кришка заряду) – 13,1 мм. Внутрішній кут конічної облицювання заряду –  $55^\circ$ , зовнішній –  $60^\circ$ .

Як матеріал для конічної КО було використано композити з порошків Al (1–50 мкм), Cu (60–160 мкм), Pb (1–40 мкм), W (50–160 мкм), Ni (1–50 мкм) та їх сумішей: Cu-Al, W-Cu-Pb, W-Cu-Pb-Al, W-Cu-Pb-Al-Ni, Ni-Al, Ni-Pb.

Базовий композит W-Cu-Pb містив таку кількість компонентів (% за масою): 50–40–10. У роботі [7] досліджувався композит W-Cu-Pb із співвідношенням компонентів 70–20–10 % (мас.). Усі нові композити з Al містили 9 % його за масою. В композиті W-Cu-Pb-Al-Ni вміст Ni – 4 % (мас.). У композиті Ni-Pb-Pb – 5 % (мас.).

Дані про пористість (абсолютну  $\Pi$  і відносну  $m$ ) використаних матеріалів наведено в роботах [2, 7]. Нижні значення наведених діапазонів відповідають пористості у вершинах КО, верхні – в основах КО. Пористість матеріалу КО вздовж твірної має проміжні значення [7]. Нагадаємо, що пористість змінюється в межах  $\Pi = 8\text{--}37\%$ ,  $m = 1,1\text{--}1,6$ . Для оцінки похибки вимірювань досліди проводилися на 5-ти ідентичних об'єктах. Об'єм кратера вимірювався за допомогою мірної бюретки і мідного порошку. Статистичний розкид об'єму каверни при штатному спрацьовуванні (детонації) заряду не перевищував 12–13 %.

Дослідження деформування і руйнування металевих перепон вибухами накладних зарядів проводили на пластинах із сталі Ст3 на ґрунтовій основі. Використовували три варіанти зарядів: циліндричні, конічні з більшою нижньою площею основи та конічні з меншою нижньою площею основи. У цих дослідах використовували дві ВР: гексоген флегматизований (ГФ) та суміш «аміачна селітра – нітрометан» (АС-НМ; 85–15 % мас.). Ініціювання електродетонатором проводилося у верхній частині заряду. Об'єми кратерів у деформованих зразках вимірювалися за допомогою мірної бюретки і води.

**Результати досліджень та їх обговорення.** У таблиці 1 наведено інформацію, що характеризує ефективність зарядів різної конструкції. У ній прийнято такі позначення:  $V_{\text{exp}}$  – обсяг ВР у заряді;  $V$  – об'єм порожнини в металевій перешкоді;  $\rho_{\text{exp}}$  – щільність ВР у заряді;  $D$  – швидкість детонації;  $H_v$  – твердість матеріалу перепони за Брінеллем, перші п'ять значень взяті з роботи [3], інші – довідкові дані; ВГП – вибуховий генератор плазми; КЗ (с) – кумулятивний заряд з конічним КО із суцільного (монолітного) матеріалу; КЗ (п) – кумулятивний заряд з конічним КО із пористого матеріалу; ГКЗ – газокумулятивний заряд з кумулятивною порожниною у вигляді циліндра; НЗ – накладний заряд.

Енергія потоку плазми у вибуховому генераторі – 7 кДж [1], енергія кумулятивного течії під час вибуху дрібнокаліберних кумулятивних зарядів масою 10 г можна оцінити величиною  $\sim 22,6$  кДж, 1 кг –  $\sim 2260$  кДж [7]. Енергію активного заряду діаметром 0,1 м, щільністю  $\approx 1000$  кг / м<sup>3</sup> при вибуху НЗ з ГФ можна оцінити

величиною 1 236 кДж, при вибуху ідентичного заряду з АС-НМ – 675 кДж. У таблиці 1 не наведено результати експериментів з НЗ із ГФ на цій мішені, оскільки в цих дослідах відбулося повне руйнування металевих пластин (рис. 1). Для визначення ефективності таких зарядів необхідні досліди на перепонах більшої товщини, або із матеріалу з більшою міцністю. Досліди з НЗ із АС-НМ показали, що найбільшу ефективність має конічний заряд при установці його на більшу основу на перепону (табл. 1). На рисунку 2 зображено залежності  $V / V_{\text{exp}}(m_{\text{exp}}^{1/3})$  ( $m_{\text{exp}}$  – маса активної частини заряду, що витрачається в перерахунку на енергію потоку плазми, кумулятивних течій та активну частину накладних зарядів). При побудові графіків використано дані з таблиці 1 для ВГП, та НЗ (крива 1), а також для КЗ(с) і КЗ(п) (крайні точки) і НЗ (проміжна точка) (крива 2). Незважаючи на незначну кількість експериментальних точок, графіки 1, 2 дають більш наглядне уявлення про вплив конструкції заряду та швидкості детонації на об'єм кратера в мішені.

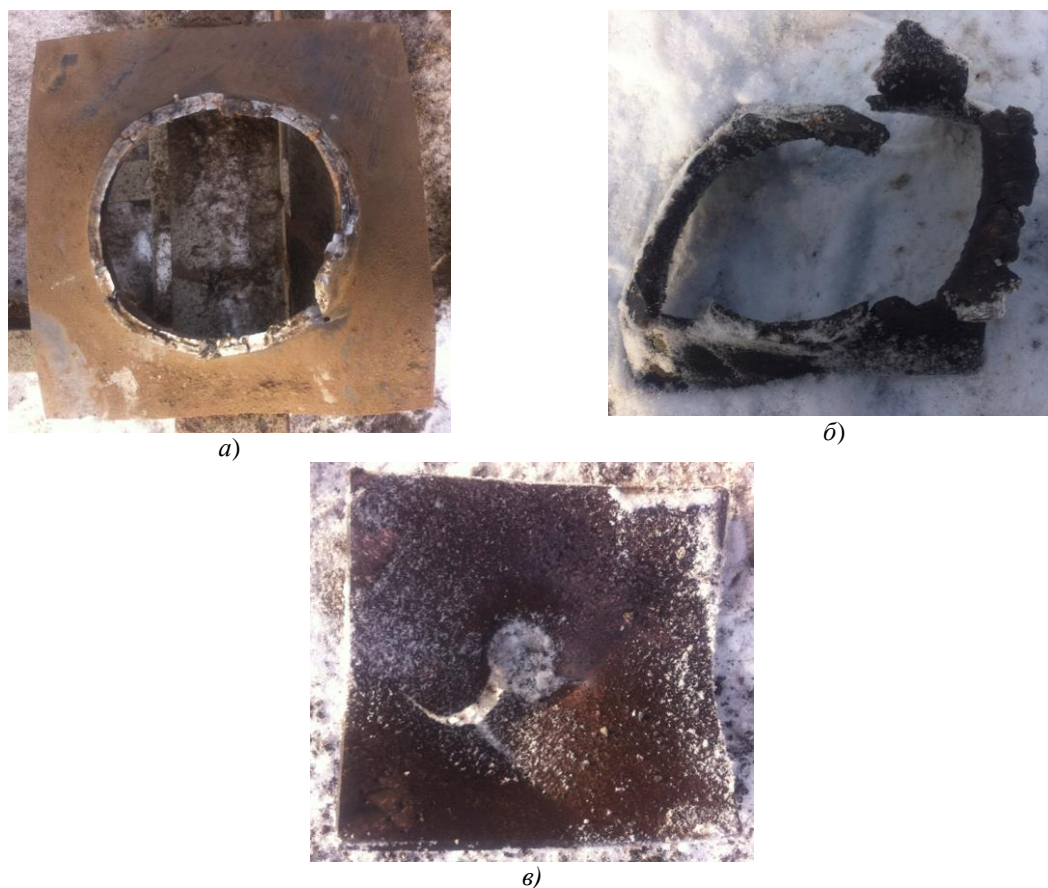


Рис. 1. Вид зразків, зруйнованих вибухом циліндричного накладного заряду ГФ (а), конічного з більшою основою на пластині (б) і конічної з меншою основою на пластині (в)

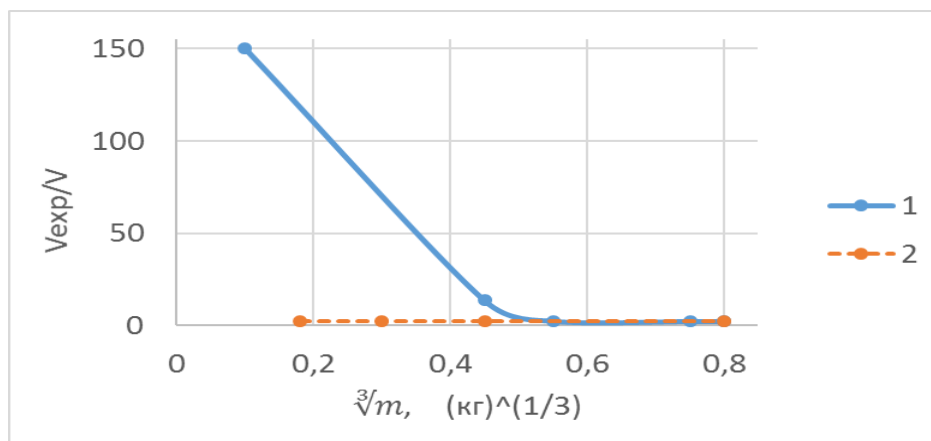


Рис. 2. Залежності відносного об'єму кратера від маси заряду: 1 – амоніт 6 ЖВ; 2 – гексоген флегматизований

№ з/п	Тип пристрою	ВР	V <sub>exp</sub> , см <sup>3</sup>	V, см <sup>3</sup>	Матеріал перепони	H <sub>в</sub> перепони, ГПа	V <sub>exp</sub> / V	ρ <sub>exp</sub> , кг/м <sup>3</sup>	D, м/с	Матеріал облицювання	Джерело
1	ВГП	Аммоніт-6ЖВ	300		Cu	0,67	250	~ 1000	4200–4450	-	[1]
2	ВГП	"-	300		АМЦ	0,75	150	~ 1000	4200–4450	-	[1]
3	ВГП	"-	300		Ст45	1,8–2,1	652	~ 1000	4200–4450	-	[1]
4	ВГП	"-	300		9ХС	2,5	800	~ 1000	4200–4450	-	[1]
5	ВГП	"-	300		ВТ3-1	3,3	833	~ 1000	4200–4450	-	[1]
6	КЗ (с)	Гексоген клас. лиття	598	190	Ст37	1,79	3,15	1675–1705	7800	Cu	[11]
7	КЗ (с)	Гексоген вібрац. лиття	598	240	Ст37	1,79	2,49	1770–1780	8400–8450	Cu	[11]
8	КЗ (с)	Октоген вібрац. лиття	598	275	Ст37	1,79	2,17	-	-	Cu	[11]
9	КЗ (п)	Гексоген флегм.(ГФ)	6,0	7,4	Ст3-АМЦ-н	1,31/0,3–0,55	0,81	1667	8100–8400	Cu	[7]
10	КЗ (с)	Окфол	6,0	4,2	Ст3-АМЦ-н	1,31/0,3–0,55	1,43	1760	8500–8700	Al	[7]
11	КЗ (п)	Окфол, ГФ	6,0	7,6–8,0	Ст3-АМЦ-н	1,31/0,3–0,55	0,79; 0,75	1760; 1667	8100–8700	Al	[7]
12	КЗ (п)	ГФ	6,0	9,0–11,0	Ст3-АМЦ-н	1,31/0,3–0,55	0,55–0,66*	1667	8100–8400	Cu-Al	[7]
13	КЗ (п)	"-	6,0	4,4–4,6	Ст3-АМЦ-н	1,31/0,3–0,55	1,3–1,36	1667	8100–8400	W-Cu-Pb	
14	КЗ (п)	"-	6,0	4,2–6,5	Ст3-АМЦ-н	1,31/0,3–0,55	0,92–1,43*	1667	8100–8400	W-Cu-Pb-Al	[7]
15	КЗ (п)	"-	6,0	4,8	Ст3-АМЦ-н	1,31/0,3–0,55	1,25	1667	8100–8400	W-Cu-Pb-Al-Ni	
16	"-	"-	6,0	6,2	Ст3-АМЦ-н	1,31/0,3–0,55	0,97	1667	8100–8400	Ni- Al	
17	"-	"-	6,0	5,6	Ст3-АМЦ-н	1,31/0,3–0,55	1,07	1667	8100–8400	Ni-Pb	
18	КЗ (п)	"-	6,0	2,7–3,2	Ст3	1,31	2,26	1667	8100–8400	Cu	[7]
19	КЗ (п)	"-	6,0	3,07	Ст3	1,31	1,62	1667	8100–8400	Al	[7]
20	КЗ (п)	"-	6,0	1,52	Ст3	1,31	3,95	1667	8100–8400	W-Cu-Pb	[7]
21	КЗ (п)	"-	6,0	10,71	АМЦ-н	0,3–0,55	0,56	1667	8100–8400	Al	
22	ГКЗ	-	72	37,6	Ст20**	1,56–1,63	1,92	1520	7800	-	[10]
23	НЗ	ГФ	39,7	30-40	АМg-6***	0,65	1,32–1,0	1300	7000	-	[12]
24	НЗ	АС+НМ	439,6	649	Ст3****	1,31	0,68	900	2985		
25	"-	"-	201,4	452	"-	"-	0,44	890	"-		
26	"-	"-	201,4	163	"-	"-	2,23	890	"-		
27	"-	ГФ	38,5	22–47	Д 16*****		1,75–0,82	1300	7000		[9]
28	"-	Аммоніт-6ЖВ	91,0	6,2–24	Д 16*****		14,6–3,79	1100	4200–4450		[9]

\*Діапазон вмісту Al відповідає максимальному значенню V

\*\*Перепона товщиною 30 мм на ґрунтовій основі

\*\*\*Перепона товщиною 25 мм на ґрунтовій основі, d<sub>3</sub>=0,045 м, h=0,025 м.

\*\*\*\*Перепона товщиною 8 мм на ґрунтовій основі d<sub>3</sub>=0,1 м; , h=0,06 м., № 24 – циліндр, № 25 – конус (верх – 35, низ – 100), № 26 (верх – 100, низ – 35).

\*\*\*\*\* – для діаметра заряду в діапазоні 0,03–0,05 м; перепона товщиною 30 мм.

Для оцінки бризантної дії НЗ, ударної дії ГКЗ та кумулятивних зарядів можна використати рівняння Горансона [3]:

$$p_2 = 2p_1(1 + R)^{-1}; \quad (1)$$

де  $p_1, p_2$  – тиск в ударних хвилях у першому і другому середовищах;  $R=A_1/A_2$  – відношення хвильових імпедансів першого та другого середовища.

Відповідно до цього рівняння, збільшити ефективність дії вибуху на перепону можна шляхом збільшення тиску падаючої хвилі. Це можливо при збільшенні швидкості детонації, або застосуванням спеціальних конструкцій зарядів, зокрема, двошарової конструкції НЗ і КЗ з зовнішнім шаром із ВР з більшою швидкістю детонації, центральним лінзовим вузлом і кільцевим ініціатором детонації зовнішнього шару. Це дозволяє отримати махівську хвилю, тиск в якій у 1,5–4 рази вищий, ніж нормальний детонаційний тиск (Чепмена–Жуге). Крім того, підвищення величини  $p_1$  при ударі струменя або компактного елемента можна домогтися, використовуючи пористі та хімічно реагуючі матеріали. Формула (1) показує також, що при контактному вибуху важливо забезпечити якісний контакт між ВР і нерівною або шорсткою поверхнею перешкоди. При його відсутності буде відбуватися ослаблення проходження ударної хвилі і зниження деформації та руйнування перепони. Це частково пояснює меншу ефективність кумулятивних зарядів, порівняно з НЗ із сипучих, або малошільних ВР, які заповнюють нерівності на гірській породі.

З таблиці 1 та рисунку 2 бачимо, що відповідно до величини  $V_{\text{exp}}/V$ , найменшою ефективністю характеризується вибуховий генератор плазми. Більшою ефективністю – кумулятивні заряди з монолітним облицюванням (Al і Cu) і ГКЗ. Ще більшою – кумулятивні заряди з пористими гомогенними облицюваннями (Al і Cu). І найбільшою – заряди з композитними облицюваннями, що містять Al. У цих експериментах вибуху зарядів діяли на масивні мішені типу напівнескінчених тіл. В експериментах з накладними зарядами і ГКЗ деформувалися пластини на маломіцній ґрунтовій основі. Тому порівняння результатів деформування перепон цими зарядами носить, відповідно, умовний характер. Напевно, накладні заряди займають проміжне положення з ефективності між ГКЗ і кумулятивними зарядами та зарядами з пористими композитними облицюваннями (досліди № 23, № 27). Але це припущення вимагає уточнення.

Підвищена ефективність кумулятивних зарядів з пористими композитними облицюваннями пояснюється тим, що композити, які містять Al, та метали з температурою плавлення  $\leq 3000^\circ\text{C}$  взаємодіють в умовах високих тисків і температури з утворенням алюмінідів і виділенням додаткового тепла аналогічно тепловому вибуху [7]. Аналогічні процеси відбуваються при взаємодії деяких металів, наприклад, Al і Cu з полімером, що містить фторполітетрафлюороетилен (PTFE), що має хімічну формулу  $[\text{C}_2\text{F}_4]_n$  [12, 13]. У роботі [13] проведено порівняння дії кумулятивного заряду з облицюваннями з PTFE і модифікованого PTFE: Cu-PTFE (38,5–61,5 %, мас.) на перепону. Калібр заряду – 40 мм, кут в основі конуса –  $55^\circ$ . Діаметр вхідного отвору збільшувався на 18,5 %, вихідного отвору в тильній пластині перепони – на 12,6 %. При цьому швидкість лідируючої частини струменя 5363 м/с, діаметр – 3,2 мм. Глибина проникнення в сталеву мішень Ст45 – 30,3 мм. Для порівняння: струмінь з PTFE діаметром 2,7 мм зі швидкістю головної частини 5575 м/с пробив канал глибиною 22,1 мм. Збільшення діаметра каналу по всій довжині вказує на виділення додаткової енергії при пробитті перепони. Автори [12] звертають увагу на механізм підвищення енергії такої ж природи при пробитті перепон, що містять алюміній, магній, титан, ударниками з PTFE в результаті хімічної екзотермічної реакції металів з PTFE. Виділення додаткового тепла сприяє збільшенню ступеня пластичної деформації і більшому викиду матеріалу з кратера на гідродинамічній стадії проникнення.

Завдяки застосуванню інтелектуальних матеріалів з необхідними інженерними властивостями, в літературі – «smart materials», збільшується кумулятивний ефект вибуху і об'єм утвореного каналу (табл. 1). Ймовірно, існують й інші пари матеріалів, зокрема, наприклад, суміші сірки з деякими металами, які при нормальних умовах є інертними, а при високих  $p$ - $T$  – параметрах в ударних хвилях хімічно взаємодіють з утворенням сульфідів і виділенням додаткової енергії. Перспективними є суміші металів з бором, або бором та алюмінієм, нікеля з титаном та цирконієм [14, 15]. Вибір найбільш перспективних композитів є темою окремого дослідження та виходить за межі даної роботи. Але критерії для вибору складу матеріалу композиту такі:

- висока щільність і оптимальна пористість матеріалу;
- висока ентальпія утворення алюмінідів, боридів, нікелідів чи сульфідів в осередку удару та достатньо низька енергія активації їх утворення.

Відповідно до цих вимог перспективними можна вважати матеріали на основі Cu, Ni, Nb, Mo, Ta, W з добавками Al, B,  $\text{AlB}_2$ . Ці критерії частково підтверджено практикою. Кумулятивні заряди з використанням матеріалу Cu-Al для облицювань використовуються ДК «Укргазвидобування» при проведенні гідророзривів пластів.

Одним із найважливіших практичних завдань є визначення критичних тисків  $p$  і температури  $T$ , при яких відбуваються екзотермічні реакції. Оскільки наявність ефекту при ударі по перепоні

високошвидкісного струменя не означає його наявності при взаємодії з перепорою ударного ядра, що рухається у 3–4 рази повільніше. Ймовірно існує критична швидкість співударяння компактного вражаючого елемента, зокрема, ударного ядра, а також критична пористість кожного композиту, при яких будуть мати місце екзотермічні реакції та виділення додаткової енергії. Підтвердженням цьому є достатньо висока температура в осередку співударяння пористого вольфрамового ударника ( $m=1,8$ ) із швидкістю 3 км/с ( $\Delta T \sim 2050^\circ$ ) з алюмінієвою мішенню. При ударі з такою ж швидкістю монолітним ударником із вольфраму – температура на порядок менша ( $\Delta T = 219^\circ$ ) [12].

Низька ефективність варіанта ВГП, описаного в роботі [1], визначається, перш за все, низькою швидкістю детонації амоніту 6 ЖВ, порівняно з гексогеном і октогеном в інших пристроях (табл. 1). Використання більш потужної ВР у цьому пристрої підвищить його ефективність, проте не на два порядки, порівняно з накладними, кумулятивними і газокумулятивними зарядами. Про це свідчать результати дослідження впливу швидкості детонації на ефективність руйнування крихких матеріалів ГКЗ [3]. Заміна в зарядах ущільненого насипного амоніту 6 ЖВ на пресований тротил призводила до збільшення поглиблення свердловин при вибуховій проходці приблизно у 4 рази.

Ефективність ГКЗ забезпечується високою щільністю і швидкістю газового кумулятивного струменя, яка перевищує швидкість детонації ВР та швидкість руху металевих кумулятивних струменів (КС) [4]. А оскільки тиск на перешкоду пропорційний квадрату швидкості, то це пояснює досить високу ефективність дії газокумулятивних зарядів не лише на крихкі, але й на металеві перепони (табл. 1).

Тепловий вибух металевих сумішей Ni-Al, Nb-Al, Ti-Al, Cu-Al, Mo-B та інших при досягненні критичної температури супроводжується утворенням алюмінідів  $Me_xAl_y$  та боридів  $Me_nB_m$  з виділенням додаткової теплоти для утворення кожного з можливих з'єднань [14–17]. Температура в зоні взаємодії пористого КС з перепорою, як правило, перевищує критичну [7].

Враховуючи те, що нагрівання матеріалу КС в перепоні відбувається як за рахунок пористості, так і за рахунок хімічних реакцій між компонентами композитного КС в перепоні, є важливою оцінка енергії екзотермічних реакцій. Для облицювання заряду масою 10–12 г тепловий баланс реакції  $Cu+2Al=CuAl_2$  складає 3,4–4,1 кДж. Це становить 15–18 % від загальної енергії КС, а в перерахунку на частину КС, яка проникає в мішень, це буде ще більший відсоток. Для інших алюмінідів міді, які можливо є в складі продуктів реакції  $AlCu_3$ ,  $AlCu_2$ ,  $AlCu$ , тепловий баланс буде вищий [17].

Мабуть, аналогічний ефект буде спостерігатися при проникненні в металеві перепони струменів, отриманих з пористих КО, що містять композити Mo-Al, Mo-B, Mo-B-Al, Ti-Al тощо. Необхідно зазначити, що теплота утворення алюмінідів міді, нікеля, титану становить, відповідно, 40–70 кДж/моль, 145–162 кДж/моль, 25–42 кДж/моль [17], що свідчить на користь композиту Ni-Al. Проте кращі результати були отримано в дослідах з композитом Cu-Al (табл. 1). Напевно це пов'язано з невдалим вибором кількості складових в композиті Ni-Al (див. [10]). Єдиним шляхом оптимізації складу даного та інших можливих композитів є отримання залежностей  $V([Al])$ , як це було зроблено для композитів Cu-Al та W-Cu-Pb-Al в роботі [7]. Таким чином, використання композитів, що містять Al, B, а також  $MgB_2$  і  $AlB_2$  при виготовленні пористих облицювань КЗ забезпечує формування необхідних інженерних властивостей матеріалів для кумулятивних зарядів. На користь двох останніх сполук свідчить їхня висока масова теплота горіння – 9,2 ккал/г та 9,1 ккал/г та достатньо висока щільність – 2,69 г/см<sup>3</sup> та 3,1 г/см<sup>3</sup>, порівняно з Al – 7,4 ккал/г і 2,7 г/см<sup>3</sup> [18].

Одне із практичних застосувань кумулятивних вибухів – це збудження детонації у ВР за допомогою КС, або компактного ударника. Наявність або відсутність детонації в кожній ВР визначається критерієм М.Хелда [13]:  $G=dv^2 > G_{cr}$  ( $d, v$  – діаметр КС та його швидкість). Ймовірно, що у випадку хімічно активних КС величина  $G_{cr}$  матиме дещо менше значення для кожної ВР, ніж наведені в [13].

На закінчення зазначимо, що на вибір конструкції зарядів для вирішення завдань гірничого виробництва впливають не лише ефективність, а перш за все, еколого-економічні критерії, простота і безпека. Так, для дроблення негабариту можуть бути рекомендовані накладні заряди конічної форми, або близької до неї з малощільних ВР ігфаніт-м, або МВС-Н (Україна). Для забезпечення стабільності детонації свердловинних зарядів – бойовики конічної форми (з розширенням в напрямку пасивного заряду) і в формі ГКЗ. Для завдань розкриття нафтових і газоконденсатних пластів – кумулятивні заряди з композитними конічними пористими облицюваннями, для вирішення спеціальних завдань у військовій справі – кумулятивні заряди з низько сферичними та іншими більш складної форми композитними пористими облицюваннями.

Автори дякують В.П. Бугайцю за допомогу в проведенні експериментів.

#### Висновки.

1. Ефективність зарядів різної конструкції за критерієм найбільшого об'єму каверни в мішені збільшується від вибухових генераторів плазми до газокумулятивних, кумулятивних з суцільними лайнерами і накладних конічних зарядів та є найвищою при вибуху кумулятивних зарядів з пористими інтелектуальними матеріалами в складі кумулятивних облицювань.



2. Для деформування і руйнування металевих перепон накладними і кумулятивними зарядами варто застосовувати вибухові речовини з високою швидкістю детонації. При використанні вибухових речовин з невисокою швидкістю детонації варто застосовувати спеціальні конструкції, наприклад, двошарову із зовнішнім ініціюванням основного заряду шаром ВР з високою швидкістю детонації. Одним із шляхів підвищення ефективності кумулятивних зарядів є використання інтелектуальних матеріалів у складі облицювання, компоненти яких реагують між собою при високих термодинамічних параметрах з виділенням додаткової енергії в перепоні. Найбільш перспективними такими матеріалами є суміші важких металів Cu, Ni, Nb, Mo, Ta, W з енергетичними добавками Al, V, AlB<sub>2</sub>, MgB<sub>2</sub>.

3. Для руйнування крихких і пластичних матеріалів з нерівною поверхнею накладними зарядами кращими є вибухові речовини, що заповнюють нерівності.

#### Список використаної літератури:

1. *Войтенко А.Е.* Образование кратера в металле ударом высокоэнтальпийной плазмы / *А.Е. Войтенко, Б.В. Свердличенко* // Журнал прикладной механики и технической физики. – 1989. – Т. 34, № 6. – С. 19–22.
2. Механическое действие кумулятивных зарядов с пористыми облицовками / *Ю.И. Войтенко, С.В. Гошовский, А.Г. Драчук, В.П. Бугаец* // Физика горения и взрыва. – 2013. – № 1. – С. 125–131.
3. *Михалюк А.В.* Эффективность зарядов разных конструкций при разрушении горных пород контактным взрывом / *А.В. Михалюк, П.А. Паришков* // Физика горения и взрыва. – 1998. – Т. 34, № 5. – С. 130–135.
4. Поле течения продуктов взрыва трубчатого заряда ВВ / *Э.Р. Прууэл, Л.А. Мерзиевский, К.А. Тен, Л.А. Лукьянчиков, В.М. Титов* // Харитоновские тематические научные чтения: труды межд. конф. ; под ред. *А.Л. Михайлова*. – Саров : ВНИИЭФ, 2009. – С. 430–435.
5. *Babkin A.V.* Analysis of influence of the sintered liner composition on the shaped-charge jet free flight behavior and its penetration capability / *A.V. Babkin, S.V. Ladov, S.V. Fedorov* // Proc. 25<sup>th</sup> Int. Symp. on Ballistics. – Beijing, China. – 2010. – Vol. 2. – Pp. 959–966.
6. Повышение эффективности взрывной отбойки на основе новых способов инициирования скважинных зарядов на карьерах / *В.И. Комащенко, В.И. Гойлик, В.А. Беллин, А.Л. Гапоненко* // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 9. – С. 293–304.
7. *Войтенко Ю.И.* Влияние алюминия на ударные свойства композитных кумулятивных струй / *Ю.И. Войтенко, В.П. Бугаец* // Вісник НТУУ «КПІ». Серія : Гірництво. – 2016. – Вып. 30. – С. 36–48.
8. *Поплавский В.А.* Повышение дробящего действия наружных зарядов ВВ / *В.А. Поплавский*. – Киев : Институт геофизики им. С.И. Субботина АН УССР, 1991. – 32 с.
9. *Поплавский В.А.* Повышение бризантного действия наружного заряда / *В.А. Поплавский, В.В. Гржибовский* // Нетрадиционные технологии взрывных работ. – Киев : Наукова думка, 1993. – С. 16–22.
10. Моделирование действия газокумулятивных зарядов на преграду / *М.Х. Абузяров, А.В. Кочетков, С.В. Крылов, Е.В. Цветкова* // Проблемы прочности и пластичности. – 2005. – Вып. 67. – С. 168–177.
11. Физика взрыва / *Ф.А. Баум, Л.П. Орленко, К.П. Станюкович, Р.П. Чельшев, Б.И. Шехтер*. – М. : Наука, 1975. – 704 с.
12. Физика взрыва / под ред. *Л.П. Орленко*. – 3-е изд., испр. – Т. 2. – М. : Физматлит, 2004. – 656 с.
13. Improved dynamic mechanical properties of modified PTFE jet penetrating charge with shell / *B.H. Chang, J.P. Yin, Z.Q. Cui, T.X. Liu* // Проблемы прочности. – 2016. – № 1. – С. 97–105.
14. *Begunov A.I.* Thermodynamic Stability of Intermetallic Compounds in Technical Aluminum / *A.I. Begunov, M.P. Kuz'min* // Journal of Siberian Federal University. Series : Engineering & Technologies. – 2014. – № 2 (7). – Pp. 132–137.
15. *Евстигнеев В.В.* Два механизма структурообразования в гетерогенной порошковой смеси Ti-Al при синтезе в режиме теплового взрыва / *В.В. Евстигнеев, В.Ю. Филимонов, С.Н. Василенко* // Ползуновский вестник. – 2004. – № 1. – С. 239–243.
16. *Гаспарян А.Т.* Макрокинетика взаимодействия и тепловой взрыв в смесях порошков Ni и Al / *А.Т. Гаспарян, А.С. Штейнберг* // Физика горения и взрыва. – 1988. – Т. 24, № 3. – С. 67–74.
17. *Письменская Е.Б.* Высокотемпературный синтез интерметаллических соединений в режиме динамического теплового взрыва : дис. ... канд. физ.-мат. наук / *Е.Б. Письменская*. – Черноголовка : Институт структурной макрокинеки и проблем материаловедения РАН. – 2000. – 179 с.
18. *Розенбанд В.* Синтез порошка диборида магния в режиме теплового взрыва / *В.Розенбанд, А.Гани* // Физика горения и взрыва. – 2014. – Т. 50, № 6. – С. 34–39.
19. *Закусило Р.В.* Засоби ініціювання промислових зарядів вибухових речовин : монографія / *Р.В. Закусило, В.Г. Кравець, В.В. Коробійчук*. – Житомир : ЖДТУ, 2011. – 212 с.
20. *Кравець В.Г.* Фізичні процеси прикладної геодинаміки вибуху : монографія / *В.Г. Кравець, В.В. Коробійчук, В.В. Бойко*. – Житомир : ЖДТУ, 2015. – 408 с.
21. *Коробійчук В.В.* Дослідження шляхів мінімізації витрат при буровибуховому способі видобування блоків декоративного каменя / *В.В. Коробійчук, Р.В. Соболевський, О.А. Зубченко* // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки. – Житомир. – 2006. – № 4 (39). – С. 301–308.
22. Дослідження впливу буровибухових робіт на якість блочної продукції кар'єру на основі визначення геометричних характеристик її тріщинуватості / *В.В. Коробійчук, Ю.О. Подчаїшський, О.О. Ремезова, Р.В. Соболевський, О.А. Зубченко* // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки. – Житомир. – 2007. – № 3 (42). – С. 143–150.

23. Криворучко А.О. Визначення оптимального напрямку ведення гірничих робіт при видобуванні блоків з природного каменю / А.О. Криворучко, В.В. Коробіичук, Р.В. Соболевський, О.В. Камських, І.В. Павлюк // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки. – Житомир. – 2016. – № 3 (78). – С. 150–163.
24. Cluster analysis of fracturing in the deposits of decorative stone for the optimization of the process of quality control of block raw material / R.Sobolevskiy, N.Zuievskaya, V.Korobiichuk, O.Tolkach, V.Kotenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – № 5/3 (83). – Pp. 21–29.
25. Definition of hue of different types of pokostivskiy granodiorite using digital image processing / V.Korobiichuk, V.Shamrai, O.Izumova, O.Tolkach, R.Sobolevskiy // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – № 4/5 (82). – Pp. 52–57.
26. The study of corrosion resistance of Pokostivskiy granodiorites after processing by various chemical and mechanical methods / I.Korobiichuk, V.Korobiichuk, M.Nowicki, V.Shamrai, G.Skyba, R.Szewczyk // Construction and Building Materials. – 1 July, 2016. – Vol. 114. – Pp. 241–247.
27. A procedure for modeling the deposits of kaolin raw materials based on the comprehensive analysis of quality indicators / R.Sobolevskiy, O.Vaschuk, O.Tolkach, V.Korobiichuk, V.Levytskyi // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2017. – № 3 (87). – Pp. 54–67.
28. Korobiichuk V. Study of Ultrasonic Characteristics of Ukraine Red Granites at Low Temperatures / V.Korobiichuk // International Conference on Systems, Control and Information Technologies 2016. – Springer International Publishing, 2016. – Pp. 653–658.

#### References:

1. Vojtenko, A.E. and Sverdlychenko, B.V. (1989), «Образование кратера в металле ударом высокоэнтальпийной плазмы», *Zhurnal prikladnoy mekhaniki y tehnycheskoj fizyki*, Vol. 34, No. 6, pp. 19–22.
2. Vojtenko, Ju.I., Goshovskiy, S.V., Drachuk, A.G. and Bugaev, V.P. (2013), «Mehanicheskoe dejstvie kumuljativnyh zarjadov s poristymi oblicovkami», *Fizika gorenija i vzryva*, No. 1, pp. 125–131.
3. Mihajluk, A.V. and Parshukov, P.A. (1998), «Jeftektivnost' zarjadov raznyh konstrukcij pri razrushenii gornyh porod kontaktnym vzryvom», *Fizika gorenija i vzryva*, Vol. 34, No. 5, pp. 130–135.
4. Pruijel, Je.R., Merzhievskij, L.A., Ten, K.A., Lukjanchikov, L.A. and Titov, V.M. (2009), «Pole techenija produktov vzryva trubchatogo zarjada VV», *Haritonovskie tematicheskie nauchnye chtenija: trudy mezhd. konf.*, in Mihajlov, A.L. (ed.), VNIIEF, Sarov, pp. 430–435.
5. Babkin, A.V., Ladov, S.V. and Fedorov, S.V. (2010), «Analysis of influence of the sintered liner composition on the shaped-charge jet free flight behavior and its penetration capability», *Proc. 25<sup>th</sup> Int. Symp. on Ballistics*, Vol. 2, Beijing, China, pp. 959–966.
6. Komashhenko, V.I., Golik, V.I., Bellin, V.A and Gaponenko, A.L. (2014), «Povyshenie jeftektivnosti vzryvnoj otbojki na osnove novyh sposobov iniciirovanija skvazhinnyh zarjadov na kar'erah», *Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten'*, No. 9, pp. 293–304.
7. Vojtenko, Ju.I. and Bugaev, V.P. (2016), «Vlijanie aljuminija na udarnye svojstva kompozitnyh kumuljativnyh struj», *Visnik NTUU «KPI»*, Serija *Girnictvo*, Vol. 30, pp. 36–48.
8. Poplavskij, V.A. (1991), *Povyshenie drobjashhego dejstvija naruzhnyh zarjadov VV*, Institut geofiziki im. S.I. Subbotina AN USSR, Kiev, 32 p.
9. Poplavskij, V.A. and Grzhibovskij, V.V. (1993), «Povyshenie brizantnogo dejstvija naruzhnogo zarjada», *Netradicionnye tehnologii vzryvnyh robot*, Naukova dumka, Kiev, pp. 16–22.
10. Abuzjarov, M.H., Kochetkov, A.V., Krylov, S.V. and Cvetkova, E.V. (2005), «Modelirovanie dejstvija gazokumuljativnyh zarjadov na pregradu», *Problemy prochnosti i plastichnosti*, Vol. 67, pp. 168–177.
11. Baum, F.A., Orlenko, L.P., Stanjukovich, K.P., Chelyshev, R.P. and Shehter, B.I. (1975), *Fizika vzryva*, Nauka, Moskva, 704 p.
12. Orlenko, L.P. (ed.) (2004), *Fizika vzryva*, 3rd ed., ispr., Vol. 2, Fizmatlit, Moskva, 656 p.
13. Chang, B.H., Yin, J.P., Cui, Z.Q. and Liu, T.X. (2016), «Improved dynamic mechanical properties of modified PTFE jet penetrating charge with shell», *Problemy prochnosti*, No. 1, pp. 97–105.
14. Begunov, A.I. and Kuz'min, M.P. (2014), «Thermodynamic Stability of Intermetallic Compounds in Technical Aluminum», *Journal of Siberian Federal University, Series Engineering & Technologies*, No. 2 (7), pp. 132–137.
15. Evstigneev, V.V., Filimonov, V.Ju. and Vasilenko, S.N. (2004), «Dva mehanizma strukturoobrazovanija v geterogennoj poroshkovej smesi Ti-Al pri sinteze v rezhime teplovogo vzryva», *Polzunovskij vestnik*, No. 1, pp. 239–243.
16. Gasparjan, A.T. and Shtejnberg, A.S. (1988), «Makrokinetika vzaimodejstvija i teplovoj vzryv v smesjah poroshkov Ni i Al», *Fizika gorenija i vzryva*, Vol. 24, No. 3, pp. 67–74.
17. Pis'menskaja, E.B. (2000), *Vysokotemperaturnyj sintez intermetallicheskih soedinenij v rezhime dinamicheskogo teplovogo vzryva*, Diss. of kand. fiz.-mat. nauk, Institut struktornoj makrokinetiki i problem materialovedenija RAN, Chernogolovka, 179 p.
18. Rozenband, V. and Gani, A. (2014), «Sintez poroshka diborida magnija v rezhime teplovogo vzryva», *Fizika gorenija i vzryva*, Vol. 50, No. 6, pp. 34–39.
19. Zakusylo, R.V., Kravec', V.G. and Korobijchuk, V.V. (2011), *Zasoby inicijuvannja promyslovyh zarjadiv vybuhovyh rehovyn*, monografija, ZhDTU, Zhytomyr, 212 p.
20. Kravec', V.G., Korobijchuk, V.V. and Bojko, V.V. (2015), *Fizychni procesy prykladnoi' geodynamiky vybuhu*, monografija, ZhDTU, Zhytomyr, 408 p.



21. Korobijchuk, V.V., Sobolevs'kyj, R.V. and Zubchenko, O.A. (2006), «Doslidzhennja shljahiv minimizacii' vytrat pry burovybuhovomu sposobi vydobuvannja blokiv dekoratyvnogo kamenja», *Zhytomyrs'kogo derzhavnogo tehnologichnogo universytetu*, Serija *Tehnichni nauky*, No. 4 (39), Zhytomyr, pp. 301–308.
22. Korobijchuk, V.V., Podchashyns'kyj, Ju.O., Remezova, O.O., Sobolevs'kyj, R.V. and Zubchenko, O.A. (2007), «Doslidzhennja vplyvu burovybuhovyh robot na jakist' blochnoi' produkcii' kar'jeru na osnovi vyznachennja geometrychnyh harakterystyk i' trishhynuvatosti», *Visnyk Zhytomyrs'kogo derzhavnogo tehnologichnogo universytetu*, Serija *Tehnichni nauky*, No. 3 (42), Zhytomyr, pp. 143–150.
23. Kryvoruchko, A.O., Korobijchuk, V.V., Sobolevs'kyj, R.V., Kams'kyh, O.V. and Pavljuk, I.V. (2016), «Vyznachennja optimal'nogo naprjamku vedennja girnychyh robot pry vydobuvanni blokiv z pryrodnogo kamenju», *Visnyk Zhytomyrs'kogo derzhavnogo tehnologichnogo universytetu*, Serija *Tehnichni nauky*, No. 3 (78), Zhytomyr, pp. 150–163.
24. Sobolevskyi, R., Zuievska, N., Korobiichuk, V., Tolkach, O. and Kotenko, V. (2016), «Cluster analysis of fracturing in the deposits of decorative stone for the optimization of the process of quality control of block raw material», *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, No. 5/3 (83), pp. 21–29.
25. Korobiichuk, V., Shamrai, V., Iziumova, O., Tolkach, O. and Sobolevskyi, R. (2016), «Definition of hue of different types of pokostivskiy granodiorite using digital image processing», *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, No. 4/5 (82), pp. 52–57.
26. Korobiichuk, I., Korobiichuk, V., Nowicki, M., Shamrai, V., Skyba, G. and Szewczyk, R. (2016), «The study of corrosion resistance of Pokostivskiy granodiorites after processing by various chemical and mechanical methods», *Construction and Building Materials*, from 1st July, Vol. 114, pp. 241–247.
27. Sobolevskyi, R., Vaschuk, O., Tolkach, O., Korobiichuk, V. and Levyskyi, V. (2017), «A procedure for modeling the deposits of kaolin raw materials based on the comprehensive analysis of quality indicators», *Vostochno-Evropskij zhurnal peredovyh tehnologij*, No. 3 (87), pp. 54–67.
28. Korobiichuk, V. (2016), «Study of Ultrasonic Characteristics of Ukraine Red Granites at Low Temperatures», *International Conference on Systems, Control and Information Technologies 2016*, Springer International Publishing, Pp. 653–658.

**Войтенко** Юрій Іванович – доктор технічних наук Українського державного геологорозвідувального інституту.

Наукові інтереси:

- відкриті гірничі роботи; вибухова справа.

Тел.: (068) 650–02–92.

E-mail: voytenkou@gmail.com.

ORCID 0000-0003-3077-2207

**Кравець** Віктор Георгійович – доктор технічних наук, професор кафедри геоінженерії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Наукові інтереси:

- відкриті гірничі роботи; вибухова справа.

Тел.: (097) 653–05–66.

E-mail: gan@geobud.kiev.ua.

ORCID 0000-0003-3077-2207

**Шукюров** Азер – директор ТОВ «Азінтерпартлайш-Х», Баку, Азербайджанська Республіка.

Наукові інтереси:

- відкриті гірничі роботи; вибухова справа.

E-mail: azer.shukurov@azinterpartlayish.com.

Orcid 0000-0003-0072-0385

**Ган** Анатолій Леонідович – кандидат технічних наук, доцент кафедри геоінженерії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Наукові інтереси:

- відкриті гірничі роботи; вибухова справа.

Тел.: (097) 653–05–66.

E-mail: gan@geobud.kiev.ua.

Orcid 0000-0003-0832-1338

**Коробійчук** Валентин Вацлавович – кандидат технічних наук, доцент кафедри розробки родовищ корисних копалин ім. проф. М.Т. Бакка Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- гірництво; будівельні матеріали; комп'ютерні технології.

Стаття надійшла до редакції 04.05.2018.