

Ю. І. Войтенко, д-р техн. наук, головний науковий співробітник
(Український державний геологорозвідувальний інститут),
voytenkou@gmail.com, ORCID-0000-0003-3077-2207,

В. П. Бугаєць, заступник директора Науково-інженерного центру
“Матеріалообробка вибухом” ІЕЗ ім. Є. О. Патона, ORCID-0000-0002-3922-8227,

А. М. Шукюров, аспірант НТУУ “КПІ ім. Ігоря Сікорського”,
ORCID-0000-0003-0072-0385

РОЗРОБКА НОВІТНІХ МОДИФІКАЦІЙ КУМУЛЯТИВНИХ ЗАРЯДІВ ДЛЯ ПЕРФОРАЦІЇ ПЛАСТІВ У ГЕОЛОГОРОЗВІДУВАЛЬНИХ І НАФТОГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИНАХ

У статті викладено результати розроблення трьох нових модифікацій кумулятивних зарядів для перфорації продуктивних пластів, зокрема зарядів для перфорації перед гідророзривом пласта та результати їх випробувань у газових свердловинах.

Ключові слова: гідророзрив пласта, перфорація, кумулятивний заряд, кумулятивне облицювання.

Видобуток газу зі щільних пісковиків, газу й нафти з глинистих сланців, а часто із традиційних колекторів забезпечується застосуванням гідророзриву пласта (ГРП) як складової технологічного процесу завершення свердловин. Успішність ГРП також забезпечується сучасними технологічними засобами, зокрема кумулятивними зарядами типу “big hole”, які створюють отвори великого діаметра в обсадній колоні та пласті.

Під час перфорації перед гідророзривом пласта потрібні отвори діаметром ≥ 20 мм і досить глибокі для запобігання так званих “стопів” – зупинок технологічного процесу, коли тріщина ГРП через отвори малого діаметра не може приймати суспензію з рідини розриву та розклинюючого матеріалу. Окрім того, навколо отвору великого діаметра в породі утворюються радіальні тріщини відповідних

розмірів, що полегшує гідророзрив завдяки зниженню порогового тиску розриву пласта.

Розробку кумулятивних зарядів для корпусних і безкорпусних перфораторів в Україні розпочали в 1999 р. за замовленнями ВО “Укргазпром” і ДГП “Укргеофізика”. З 2001 р. роботи фінансували з державного бюджету. До 2008 р. було розроблено засоби ініціювання: вибухові патрони, детонуючі шнури, малогабаритні та великогабаритні заряди для безкорпусних перфораторів. Варто зазначити, що автором ідеї відкриття такої тематики в УкрДГПІ був д-р технічних наук С. В. Гошовський. Результати діяльності науковців у галузі технічних наук часто є кладовищем мертвих ідей і незавершених технічних рішень через об’єктивні і суб’єктивні причини. Ця ідея виявилася продуктивною і дала для України новий

науково-технічний напрям у галузі високоенергетичної обробки матеріалів, техніки і технології прострілювально-вибухових робіт у свердловинах на нафту й газ. У роботах активну участь брали працівники УкрДГРІ: завідувач лабораторії Д. Д. Глагола, співробітники лабораторії В. О. Клібанець, О. Г. Драчук, М. І. Боримчук, В. П. Бугаєць, В. П. Симороз, І. В. Лобанова та ін. Усебічну підтримку цьому напрямку приділяв колишній директор УкрДГРІ, д-р. геол. наук М. Д. Красножон. Дослідно-промислові зразки розроблюваної техніки випробовували загони ДГП “Укргеофізика”. Фактично учасниками процесу розробки були співробітники ДГП “Укргеофізика” Я. М. Заворотько, О. Д. Трум, В. І. Тихоненко, А. М. Кучинський, М. М. Литвиненко, В. О. Пінчук, О. М. Пироженко та ін.

У процесі науково-дослідної роботи визначено основні характеристики порошкових композитів і гомогенних порошків для зарядів різних калібрів, дизайн цих

зарядів, а також оптимальні конструкції перфораторів.

Одним з незвичних, невідомих раніше в експериментах явищ було посилення ударних властивостей композитних кумулятивних струменів (КС) додаванням Al [2, 3, 5].

У 2015–2016 р. у зв’язку з появою на світовому ринку, і зокрема в Україні, зарядів серії “DPEX” (глибоке проникання з розширеним каналом) ми повернулися до ідеї зарядів з кумулятивним облицюванням (КО), які вміщують Al.

Експерименти, проведені з композитними КО Cu-Al, W-Cu-Pb-Al, W-Cu-Pb-Ni-Al, Ni-Al на зарядах ЗКМ-38Д (маса вибухової речовини (ВР) – 10 г, калібр заряду – 26 мм), показали стале зростання об’єму каналу зі збільшенням умісту Al для всіх записаних вище композитів (рис. 1). Основний механізм збільшення об’єму каналу перфорації за взаємодії порошкового Al з металами: Cu, Ni, можливо Fe, Zn, Mo, та ін., які мають температуру плавлення ≤ 2800 °С, пов’язаний з утворенням

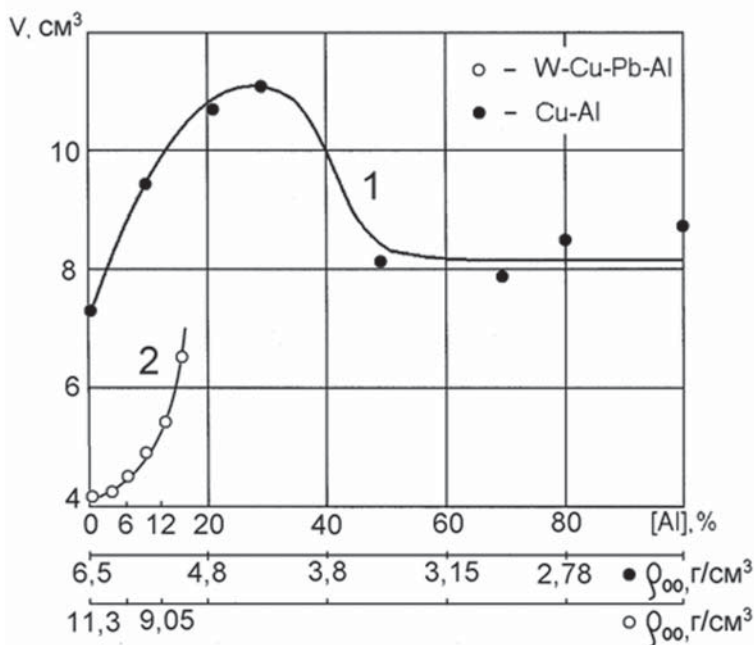


Рис. 1. Залежність об’єму кратера в перепоні Ст. 3 – АМЦ-н від умісту Al у композитах Cu-Al (крива 1) і W-Cu-Pb-Al (крива 2)

інтерметалідів Cu_xAl_y , Ni_xAl_y (в інших джерелах – алюмінідів) з виділенням додаткової енергії. Наприклад, під час утворення інтерметаліду $CuAl_2$ (рис. 2) виділяється додаткове тепло в кількості ≈ 330 Дж/моль.

Оскільки збільшення вмісту Al у композитах супроводжується збільшенням вхідного діаметра, об'єму каналу і зменшенням глибини, то цей результат дає змогу отримати три технологічних застосування:

- у разі великого вмісту Al заряд створює широкий канал невеликої глибини, так званий тип зарядів “big hole” (ВН) для перфорації пласта перед гідророзривом;

- у разі оптимального вмісту Al заряд створює глибокий канал збільшеного об'єму (тип заряду “DPEX” – глибокого проникання, розширений в об'ємі);

- у разі відсутності Al у складі матеріалу заряд працює як кумулятивний заряд глибокого проникання (“DP”).

Ураховуючи те, що для кумулятивних зарядів критерії подібності зазвичай не

виконуються, в окремій серії експериментів був відпрацьований варіант заряду для ГРП з калібром 40 мм – ЗП2 – 62 ВН.

На замовлення ДК “Укргазвидобування” в жовтні-листопаді 2016 р. виготовлено дослідну партію зарядів (1 000 шт.) ЗП2-62 ВН (маса ВР – 23 г). Ці заряди використано для перфорації пластів перед проведенням гідророзривів у кількох свердловинах Західностаровірівського та Східнополтавського родовищ. Гідророзриви пластів проведено успішно, що свідчить про відповідність зарядів необхідним технічним вимогам.

У 2017 р. ДК “Укргазвидобування” замовила промислову партію зарядів ЗП2-62 ВН і продовжує їх використання.

Варіанти заряду “DPEX” відпрацьовано також на заряді ЗКМ-38Д. Порівняння технічних характеристик проводили з одним із аналогів іноземного виробництва відомої компанії способом порівняльних випробувань на мішені сталь Ст. 3 – АМЦ-н. У результаті випробувань особливих відмінностей за розміром та об'ємом каналу

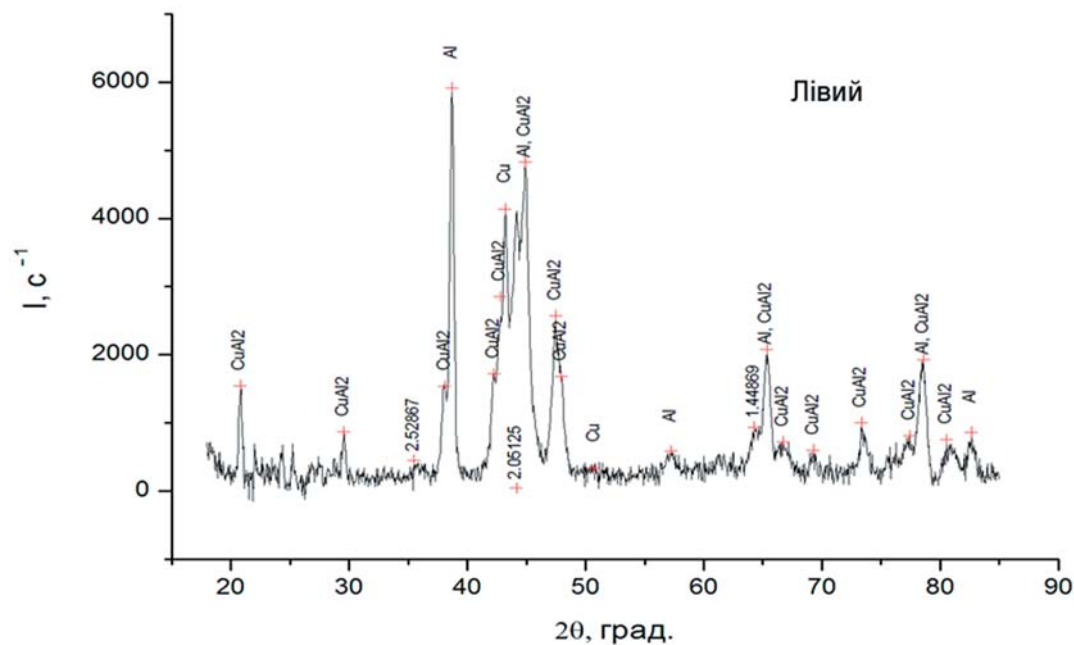


Рис. 2. Дифрактограма матеріалу, утвореного за взаємодії струменя із Cu-Al з перепорою АМЦ-н

не відзначено. Це свідчить про правильність вибраного напрямку досліджень і позитивний технологічний результат. Про це говорить і те, що у всіх проведених експериментах з композитами, які містили Al, стабільно спостерігалось збільшення об'єму каналів на 10–90 % порівняно з чистими металами (Cu і Ni) і композитами без Al.

Варто зазначити, що всі типи зарядів (ВН, DPEX, DP – глибокого проникання) одного калібру виготовляються за допомогою єдиного комплексу інструментів, при цьому деталі пари “пуансон-матриця” не змінюють своїх форм і розмірів для всіх типів зарядів, що позитивно впливає на вартість виробів. Ця відносно невисока вартість стримує рівень цін на заряди та інші комплектуючі перфораторів.

Наступним етапом має бути вдосконалення зарядів способом зміни конфігурації КО та зміни схеми збудження детонації. Про це свідчить безперервний прогрес у створенні нових технічних рішень у цій галузі науки й техніки [1, 6, 7, 10]. В останні роки з'явилися заряди глибокого проникання другого та третього поколінь (DP2, DP3).

Особливої уваги заслуговують деякі результати досліджень, які дають змогу значно підвищити кінетичну енергію КС або компактного елемента (КЕ), або енергію ударної взаємодії КС і КЕ з перепонами [1, 2, 4, 7–9, 11]. Ураховуючи те, що кумулятивні заряди і технології, пов'язані з їх виготовленням і застосуванням, це подвійні технології, результатами цих технологічних розробок є також ефективні засоби боротьби з танками та іншою броньованою технікою, наземними та підземними фортифікаційними спорудами, або шлях до їх створення. Крім того, додатковим результатом є технічні засоби руйнування та розміцнення геоматеріалів у цивільних сферах їх застосування: будівельній, гірничодобувній і нафтогазовій галузях промисловості [4, 8, 11].

Ураховуючи зростаючу актуальність таких досліджень, доцільною була б міжгалузєва програма науково-дослідних ро-

біт з дослідження впливу матеріалів, дизайну та способів ініціювання детонації на ефективність кумуляції енергії вибуху.

Висновок. Розроблено рецептури матеріалів КО для кумулятивних зарядів типу “big hole” для ГРП, зарядів типу “DPEX” глибокого проникання зі збільшеним об'ємом перфораційного каналу та розпочато їх дослідно-промислові випробування. Розроблені рецептури матеріалів можна використовувати в зарядах інших калібрів після проведення додаткових експериментів.

Розробку здійснено за фінансової підтримки НІЦ “Матеріалообробка вибухом” ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України та ТОВ НТП “Агрософт”.

Автори вдячні директору НІЦ “Матеріалообробка вибухом” ІЕЗ ім. Є. О. Патона, канд. техн. наук Л. О. Волгіну за допомогу в організації робіт на випробувальній дільниці підприємства.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Баланкин А. С., Любомудров А. А., Севрюков И. Т. Кинетическая теория кумулятивного бронепробивания. – М.: Изд-во Министерства обороны СССР, 1989. – 271 с.*
2. *Войтенко Ю. И. Влияние алюминия на ударные свойства композитных кумулятивных струй/Ю. И. Войтенко, В. П. Бугаец/Вісник НТУУ “КПІ”. Серія “Гірництво”. – 2016. – Вип. 30. – С. 36–48.*
3. *Войтенко Ю. И., Гошовский С. В., Драчук А. Г., Бугаец В. П. Механическое действие кумулятивных зарядов с пористыми облицовками//Физика горения и взрыва. – 2013. – № 1. – С. 125–131.*
4. *Михалюк А. В. Эффективность зарядов разных конструкций при разрушении горных пород контактным взрывом/ А. В. Михалюк, П. А. Паршуков//Физика горения и взрыва. – 1998. – Т. 34. – № 5. – С. 130–135.*
5. *Патент на корисну модель 54442 UA, МПК Е 21В 43/117. Кумулятивний заряд/ Войтенко Ю. І. (UA); Гошовський С. В. (UA); Драчук О. Г. (UA); Прожогіна О. І. (UA) – № u201005191; заявл. 20.04.2010; опубл. 10.11.2010, бюл. – № 21. – 3 с.*

6. Тимошенко А. Б. Моделирование функционирования боевых частей, содержащих снарядоформирующие элементы/ А. Б. Тимошенко, И. Б. Чепков//Военно-технический сборник. – 2011. – Вып. 2. – № 5. – С. 73–81.

7. Федоров С. В. Численный анализ влияния геометрических параметров комбинированной кумулятивной облицовки на массу и скорость формируемых компактных элементов/Федоров С. В., Баянова Я. М., Ладов С. В.//Физика горения и взрыва. – 2015. – № 1. – С. 150–164.

8. Glenn L. A. Pressure-Enhanced Penetration with Shaped-Charge Perforators/ L. A. Glenn//Society of Petroleum Engineers. Paper No. SPE-51052, SPE Eastern Regional Meeting. – Pittsburgh, 1998. – P. 9–11.

9. Held M. Liners for shaped charges/ M. Held//Journal of battlefield technology. – 2001. – Vol. 4. – № 3. – P. 1–6.

10. Shekhar H. Theoretical Modelling of Shaped Charges in the Last Two Decades (1990–2010): A Review//H. Shekhar//Central European Journal of Energetic Materials. – 2012. – Vol. 9 (2). – P. 155–185.

11. Terentiev O. M. Rocks fracturing with explosive-mechanical means/O. M. Terentiev, P. A. Gontar//Вісник Національного технічного університету “Київський політехнічний інститут”. Серія “Гірництво”. – 2015. – Вип. 28. – С. 72–76.

REFERENCES

1. Balankin A. S., Lubomudrov A. A., Sevryukov I. T. The kinetic theory of shaped charge penetration of armor. – Moscow: Publishing House of the Ministry of Defense of the USSR, 1989. – 271 p. (In Russian).

2. Voitenko Yu. I., Buhaets V. P. The influence of aluminum on impact properties of composite shaped charges jets//Herald of the National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”. Series of “Mining”. – 2016. – V. 30. – P. 36–48. (In Russian).

3. Voitenko Yu. I., Goshovskyi S. V., Drachuk A. G., Buhaets V. P. Mechanical action of shaped charges with porous liners//Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2013. – № 1. – P. 125–131. (In Russian).

4. Mihalyuk A. V., Parshukov P. A. The effectiveness of charges of various designs in the destruction of rocks by contact explosion// Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 1998. – Vol. 34. – № 5. – P. 130–135. (In Russian)

5. Patent # 54442 UA, IPC E 21B 43/117. Shaped charge/Voitenko Yu. I. (UA); Goshovsky S. V. (UA); Drachuk O. G. (UA); Prozhogina O. I. (UA). – No. u201005191; Claimed. 20.04.2010; publ. 10.11.2010, bul. – № 21. – 3 p. (In Ukrainian).

6. Timoshenko A. B., Chepkov I. B. The simulation studies of explosively formed projectiles//Military Technical Collection. – 2011. – Iss. 2. – № 5. – P. 73–81. (In Russian).

7. Fedorov S. V., Bayanova Ya. M., Ladov S. V. Numerical analysis of the effect of geometric parameters of a combined liner on the mass and speed of explosively formed projectiles//Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2015. – № 1. – P. 150–164. (In Russian).

8. Glenn L. A. Pressure-Enhanced Penetration with Shaped-Charge Perforators//Society of Petroleum Engineers. Paper No. SPE-51052, SPE Eastern Regional Meeting. – Pittsburgh, 1998. – P. 9–11.

9. Held M. Liners for shaped charges//Journal of battlefield technology. – 2001. – Vol. 4. – № 3. – P. 1–6.

10. Shekhar H. Theoretical Modelling of Shaped Charges in the Last Two Decades (1990–2010): A Review//Central European Journal of Energetic Materials. – 2012. – V. 9 (2). – P. 155–185.

11. Terentiev O. M., Gontar P. A. Rocks fracturing with explosive-mechanical means// Herald of the National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”. Series of “Mining”. – 2015. – Vol. 28. – P. 72–76.

Рукопис отримано 10.03.2017.

Ю. И. Войтенко, Украинский геологоразведочный институт, ORCID-0000-0003-3077-2207,
В. П. Бугаец, Научно-инженерный центр “Материалобработка взрывом” ИЭС
им. Е. О. Патона, ORCID-0000-0003-3077-2207,

А. М. Шукюров, НТУУ “КПИ им. Игоря Сикорского”, ORCID-0000-0003-0072-0385

РАЗРАБОТКА НОВЕЙШИХ МОДИФИКАЦИЙ КУМУЛЯТИВНЫХ ЗАРЯДОВ ДЛЯ ПЕРФОРАЦИИ ПЛАСТОВ В ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ И НЕФТЕГАЗО- ВЫХ СКВАЖИНАХ

В статье изложены результаты разработки трех новых модификаций кумулятивных зарядов для перфорации продуктивных пластов, в том числе зарядов для перфорации перед гидроразрывом пласта и результаты их испытаний в газовых скважинах. Все заряды одного калибра изготавливаются с помощью одного пресс-инструмента. Параметры перфорационных отверстий: глубина, диаметр входного отверстия, объем канала регулируются составом композитного материала облицовки кумулятивной выемки. Регулятором размеров и объема канала является Al. Кумулятивные заряды прошли успешные испытания при проведении гидроразрыва в газовых скважинах на нескольких месторождениях восточного нефтегазоносного региона.

Ключевые слова: гидроразрыв пласта, перфорация, кумулятивный заряд, кумулятивная облицовка.

Yu. I. Voitenko, Ukrainian state geological research institute, ORCID-0000-0003-3077-2207,

V. P. Buhaets, Scientific and engineering center “Material processing explosion” welding institute. E. O. Paton, ORCID-0000-0003-3077-2207,

A. M. Shukiurov, NTUU “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, ORCID-0000-0003-0072-0385

DEVELOPMENT OF THE NEW MODIFICATIONS OF SHAPED CHARGES FOR PERFORATING OF RESERVOIRS IN GEOLOGICAL AND OIL-GAS WELLS

The article presents the results of development of three new modifications of shaped charges for perforation of reservoirs, including charges for perforation prior to hydraulic fracturing and the results of their testing in gas wells. All charges of one caliber are made with a single press tool. Parameters of perforations: the depth, diameter of the inlet, the volume of the channel are regulated by the composition of the composite material of the liner. The regulator for the size and volume of the channel is Al. Shaped charges were tested during the hydraulic fracturing in gas wells at several fields in the eastern oil and gas bearing region.

Keywords: hydraulic fracturing, perforation, shaped charge, liner.