

ФОРМУВАННЯ КОМБІНОВАНОГО РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХО-МЕХАНІЧНИМИ НАВАНТАЖЕННЯМИ

О. М. Терентьев, П. А. Гонтарь, А. И. Клещев

Институт энергосбережения та енергоменеджменту

вул. Борщагівська 115, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: oltr_1@ukr.net

Приведено результати системного аналізу комбінованого руйнування гірських порід. Запропонована нова класифікація комбінованих навантажень на вибій із застосуванням теорії графів. Обрано граф Тудора Замфіреску для класифікації способів руйнування гірських порід. Граф дозволяє формувати максимальну кількість зв'язків між вершинами. Кожна вершина відповідає способу руйнування гірських порід. Таким чином дуги графа сполучають вершини, формуючи комбінації способів. Це дозволило виділити 132 можливі комбінації способів. Таким чином запропоновано раціональне поєднання механічних (оберткових) і немеханічних (вибухових) руйнівних навантажень. Визначено, що енергія вибуху поєднує наступні руйнівні чинники: швидкість навантаження, тиск, температуру та електромагнітні коливання. Доповнення цих чинників ефектом Манро дозволяє отримати контрольовану енергію вибуху, що діє на вибій, доповнюючи природну тріщинуватість технологічною. Таким чином міцнісні властивості гірських порід знижуються, що полегшує руйнування механічним різанням. Так, комбіноване руйнування забезпечує зниження питомої енергоємності завдяки попередньому послабленню гірських порід доповненням природної тріщинуватості технологічною.

Ключові слова: комбіноване руйнування, фізико-механічні навантаження, послаблення гірських порід, технологічна тріщинуватість, енергоємність руйнування, вибухо-механічне руйнування.

ФОРМИРОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ВЗРЫВО-МЕХАНИЧЕСКИМИ НАГРУЗКАМИ

О. М. Терентьев, П. А. Гонтарь, А. И. Клещев

Институт энергосбережения и энергоменеджмента

ул. Борщаговская 115, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: oltr_1@ukr.net

Представлены результаты системного анализа комбинированного разрушения горных пород. Предложена новая классификация комбинированных нагружений на забой с использованием теории графов. Выбран граф Тудора Замфиреску для классификации способов разрушения горных пород. Граф позволяет формировать максимальное количество связей между вершинами. Каждая вершина отвечает способу разрушения горных пород. Таким образом, дуги графа соединяют вершины, формируя комбинации способов. Это позволило выделить 132 возможные комбинации способов. Так, предложено рациональное сочетание механических (вращательных) и немеханических (взрывных) разрушительных нагрузок. Определено, что энергия взрыва объединяет следующие разрушающие факторы: скорость нагружения, давление, температуру и электромагнитные колебания. Дополнение этих факторов эффектом Манро позволяет получить контролируемую энергию взрыва, которая воздействует на забой, дополняя природную трещиноватость технологической. Таким образом, прочностные свойства горных пород снижаются, облегчая разрушение механическим резанием. Так, комбинированное разрушение обеспечивает снижение удельной энергоёмности за счет предварительного ослабления горных пород доплением к природной технологической трещиноватостью.

Ключевые слова: комбинированное разрушение, физико-механические нагружения, ослабление горных пород, технологическая трещиноватость, энергоёмность разрушения, взрыво-механическое разрушение.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. На видобуток паливно-енергетичних ресурсів та будівельних матеріалів в Україні за період 2013 року витрачено 11000 млн. кВт·год електроенергії [1]. На руйнування та подрібнення гірських порід (ГП) витрачається понад 10 % електроенергії, що виробляється в країнах СНГ [2]. Руйнування ГП при формуванні свердловин на 90 % забезпечують станки шарошкового типу [3]. При цьому темпи руйнування ГП досягли свого піку, і подальша оптимізація практично неможлива. Тому проводяться пошуки комбінацій механічних та немеханічних способів з метою зниження енергоємності руйнування ГП. Актуальність проблеми підтверджена постановою Кабінету Міністрів України від 1 березня 2010 р. № 243 «Про затвердження

Державної цільової економічної програми енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлювальних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010–2015 роки» [4].

Поєднання фізико-механічних властивостей вибухових та оберткових навантажень на вибій формує сукупність технологічної та природної тріщинуватостей. В свою чергу, це призводить до зниження енергоємності руйнування ГП в межах вибою.

Енергія вибуху поєднує наступні руйнівні чинники: швидкість навантаження, тиск, температура продуктів детонації, електромагнітні коливання. Вплив вибухової хвилі на вибій формує технологічну тріщинуватість вглиб масиву, додатково до природної. Таким чином, знижуються міцнісні власти-

вості ГП і відповідно знижуються витрати енергії на механічне руйнування.

Незважаючи на енергетичні показники вибухової хвилі, актуальним завданням щодо удосконалення вибухо-механічного руйнування є забезпечення керуваності вибуху, тобто спрямування енергії вибуху перпендикулярно до вибою ураховуючи конструктивні вимоги ріжучого інструменту механічної дії.

Мета роботи – дослідження процесу формування комбінованого руйнування гірських порід вибухо-механічними навантаженнями, пошук раціонального поєднання механічного та немеханічного (фізичного) джерел руйнівної енергії та формуванню універсального способу руйнування гірських порід.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Необхідність зменшення енергоємності видобутку корисних копалин сприяла розвитку технологій руйнування ГП. До теперішнього часу розроблено достатньо способів комбінованого руйнування [5–9]. Більшість з них орієнтується на певний склад ГП (крихкі або пластичні; міцні або м'які; щільні або рихлі тощо). Тому існує необхідність в розробці універсального способу руйнування ГП, що можливо застосовувати в широкому діапазоні ГП.

Одним з найбільш відомих способів комбінованого руйнування ГП є застосування пневмоударників [5] що забезпечує ударно-обертове руйнування. Сучасні станки пневмоударної дії компанії «Atlas Copco» руйнують граніти ($f = 9-12$) зі швидкістю 40 м/год [5]. При цьому безвідмовність твердосплавних різців робочого інструменту сягає 1–1,4 км погонних [5], а витрати пального 0,06 м³/год [5]. Недоліком пневмоударників є непрацездатність робочого інструмента в умовах пластичних ГП.

Інтенсифікація гідромеханічного руйнування відбувається з використанням гідродинамічної кавітації [6]. Робочі інструменти з кавітаційним генератором реалізують частоту періодично зривної кавітації до 5 кГц [6]. В порівнянні з обертовим руйнуванням енергоємність знизилась на 15–20 %, а швидкість зростає на 30–50 % [6]. Експериментальні дослідження проводились в умовах вапняків і доломітів [6]. В умовах обводненості свердловин частота гідродинамічних імпульсів впливає не безпосередньо на ГП, а на підземні води. Це призводить до зниження ефективності руйнування ГП. Виникає необхідність застосовувати потужніші генератори, або попередньо осушувати свердловини.

Створення гідротермічного формування свердловин дозволило уникнути плавлення ГП, що відбувалось під час термічного руйнування. На вибій під тиском нагнітається суміш газ–окисник, де вони змішуються. Система ініціювання підпалює суміш. Одночасно нагнітається вода, яка на вибої підігривається до температури 1000–1300 К унаслідок горіння газів. У масиві ГП виникає градієнт температур, що викликає розтягуючі напруження. При цьому відбувається термічний зкол або лущення. Згідно з

[7] швидкість гідротермічного руйнування граніту сягає 1,5 м/год, кварциту – 2,9 м/год, піщаника – 4,3 м/год. Діаметр свердловини коливався відповідно від 5,0 см до 4,6 см [7].

Розроблено комбіноване лазерно-механічне руйнування ГП [8]. Компанія «FogoEnergy» провела низку експериментів, використовуючи волоконний лазер потужністю 20 кВт.

Лазер розміщено в продувному каналі робочого інструменту з твердосплавними різцями. При діаметрі робочого інструменту 0,15 м швидкість руйнування граніту сягає 4 м/год [8], базальту 5 м/год [8], піщаника 6 м/год [8].

Енергоємність руйнування при цьому сягає 90...300 кВт·год/м³ [8]. Хоча діаметр лазерного променя і обмежений, навколо утвореної свердловини формується тріщинуватість внаслідок градієнта температур. Тріщинуватість послаблює ГП та полегшує механічне руйнування.

Представники компанії «FogoEnergy» (<http://www.fogoenergy.com/>) заявляють, що під час лазерно-механічного руйнування зростає швидкість в 2...4 рази, зменшується вертикальне зусилля до < 4,5 кН і обертальний момент < 400 Н·м. При цьому в обводненому середовищі енергія лазера буде витрачатись на нагрівання води. В умовах пластичних і в'язких ГП можливе закупорювання оптики.

Відоме хіміко-гідралічне формування свердловин з допомогою водяного розчину соляної кислоти (HCl) [9]. Швидкість руйнування доломітів та вапняків в Тіmano-Печорській провінції (Росія) сягає 6–60 м/год, при витратах кислоти 5 м³ на 1 погонний метр свердловини [9]. При цьому застосовано 15–30 %-ний розчин HCl. Для формування нафтодобувних свердловин у Кувейті та Оклахомі (США) використано 10–15 % розчин HCl. Швидкість руйнування вапняків сягала відповідно 14 та 27 м/год. [10].

До недоліків хіміко-гідралічного руйнування відносять обмеженість області застосування карбонатними ГП (кальцити, доломіти, вапняки). Ефективність руйнування залежить від пористості та проникуючої здатності ГП. На якість реакції впливає температура середовища. Чим вища температура, тим краще розчиняється ГП [11]. Рівень реакції збільшується вдвічі з кожним зростанням температури на 265 К [11].

Для класифікації комбінованого руйнування ГП застосовано теорію графів [12]. Це дозволило візуально точно оцінити кількість можливих комбінацій, швидко виділити необхідну комбінацію та спланувати розробку нової. Також графи дозволяють розташовувати способи руйнування в певній послідовності, або групувати їх у класи за певною ознакою. Таким чином обрано орієнтовний граф Тудора Замфреску з 12-ма вузлами (рис. 1).

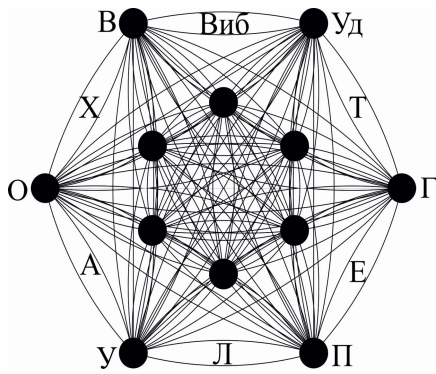


Рисунок 1 – Орієнтовний граф Тудора Замфіреску для класифікації комбінованого руйнування гірських порід: А – абразивне руйнування; Виб – вибухове; В – вібраційне; Г – гідравлічне; Е – електроімпульсне; Л – лазерне; О – обертове;

П – плазмове; Т – термічне; Уд – ударне; У – ультразвукове; Х – хімічне

Граф Тудора Замфіреску дозволяє кожній вершині формувати максимальну кількість зв'язків (11). Форма графа дозволяє доповнювати його новими вершинами, зберігаючи максимальну кількість зв'язків. Вершини відповідають одиничному навантаженню (механічному або немеханічному), що руйнує ГП. Не строго паралельні дуги графа сполучають між собою вершини в двох напрямках, формуючи подвійні комбінації з кожною парою вершин.

Для визначення можливих комбінацій способів руйнування ГП побудовано бінарну матрицю до графу (рис. 2). По горизонталі та вертикалі розташовані скорочені назви одиничних навантажень, що руйнують ГП. На перетині вертикальних і горизонтальних ліній формуються комбінації одиничних способів руйнування ГП.

	В	О	Уд	А	Виб	Г	Е	Л	П	Т	У	Х
В	В	В-О	В-Уд	В-А	В-Виб	В-Г	В-Е	В-Л	В-П	В-Т	В-У	В-Х
О	О-В	О	О-Уд	О-А	О-Виб	О-Г	О-Е	О-Л	О-П	О-Т	О-У	О-Х
Уд	Уд-В	Уд-О	Уд	Уд-А	Уд-Виб	Уд-Г	Уд-Е	Уд-Л	Уд-П	Уд-Т	Уд-У	Уд-Х
А	А-В	А-О	А-Уд	А	А-Виб	А-Г	А-Е	А-Л	А-П	А-Т	А-У	А-Х
Виб	Виб-В	Виб-О	Виб-Уд	Виб-А	Виб	Виб-Г	Виб-Е	Виб-Л	Виб-П	Виб-Т	Виб-У	Виб-Х
Г	Г-В	Г-О	Г-Уд	Г-А	Г-Виб	Г	Г-Е	Г-Л	Г-П	Г-Т	Г-У	Г-Х
Е	Е-В	Е-О	Е-Уд	Е-А	Е-Виб	Е-Г	Е	Е-Л	Е-П	Е-Т	Е-У	Е-Х
Л	Л-В	Л-О	Л-Уд	Л-А	Л-Виб	Л-Г	Л-Е	Л	Л-П	Л-Т	Л-У	Л-Х
П	П-В	П-О	П-Уд	П-А	П-Виб	П-Г	П-Е	П-Л	П	П-Т	П-У	П-Х
Т	Т-В	Т-О	Т-Уд	Т-А	Т-Виб	Т-Г	Т-Е	Т-Л	Т-П	Т	Т-У	Т-Х
У	У-В	У-О	У-Уд	У-А	У-Виб	У-Г	У-Е	У-Л	У-П	У-Т	У	У-Х
Х	Х-В	Х-О	Х-Уд	Х-А	Х-Виб	Х-Г	Х-Е	Х-Л	Х-П	Х-Т	Х-У	Х

Рисунок 2 – Бінарна матриця комбінованого руйнування гірських порід

Згідно з бінарною матрицею руйнування ГП можливе 132 комбінаціями одиничних навантажень: механічний-механічний, механічний-немеханічний, немеханічний-немеханічний.

Проведено аналіз механічних та немеханічних (фізичних) способів руйнування ГП. Головними критеріями ефективності обрано енергоємність руйнування (кВт·год/м³), швидкість руйнування (м/год), міцність ГП за шкалою М.М. Протод'яконова (в.о.). Серед механічного руйнування ГП найбільшою енергоємністю характеризується ударно-обертовий спосіб (190 кВт·год/м³) [2]. Це пов'язано з роботою пневмоударника, додатково до осьового навантаження та крутного моменту. Тому необхідно замінити роботу пневмоударника джерелом фізичних навантажень. Таким чином, щоб забезпечити фізико-механічне руйнування ГП.

Серед фізичних способів руйнування, енергія вибуху є працездатною в ГП з міцністю від 1 до 20 за шкалою проф. М. М. Протод'яконова. Енергоємність 136–410 кВт·год/м³ [2] є одним з найменших показників серед немеханічних способів руйнування. При цьому реалізація самостійного вибухового руйнування обмежена швидкістю (10–15 м/год) [13] та витратами вибухової речовини (ВР) на рівні 28,60 кг/м³ [13]. Під час дослідів [14] виявлено, що співвідношення маси зруйнованої ГП до маси ВР збільшилось зі зростанням глибини вибою. Це свідчить про ефективність вибухового руйнування зі зростанням гідростатичного тиску. Тому запропоновано вибухо-механічне руйнування ГП. Таким чином обертове руйнування доповнюється вибуховим. Принцип дії полягає в тому, що енергія вибуху формує технологічну тріщинуватість, додатково до природної. Після чого ріжучий інструмент механічної

дії руйнує, послаблену ГП комплексною тріщинуватістю. В результаті досягається зниження енергоємності механічного руйнування і можливість руйнування ГП з різними фізико-механічними властивостями.

Реалізація комбінованого руйнування полягає в одночасному впливі вибухових та механічних навантажень. Аналіз вітчизняної та зарубіжної літератури свідчить про відсутність даних щодо промислового застосування вибухо-механічного руйнування ГП. При цьому є патенти США [15–17], які вперше запропонували поєднання вибухових на механічних навантажень для руйнування ГП. У результаті ознайомлення виявлено низку недоліків, які виправлено в запропонованому способі.

Так, відомий патент пропонує комбіноване руйнування ГП, що включає введення до вибою потоком промивної рідини розчинних у воді капсул. Капсули містять ВР, яка під дією тиску робочого інструменту забезпечує мініатюрні вибухи на вибої [15]. Зазначений спосіб дає змогу послабити масив ГП та полегшити механічне руйнування вибою. Недоліки: розсіювання енергії вибуху; вплив енергії вибуху на коронку робочого інструменту механічної дії.

Наступний патент передбачає руйнування ГП внесенням зарядів ВР до вибою по промивному каналу з послідуємим їх вибухом [16]. Даний спосіб передбачає направленість дії енергії вибуху за рахунок конусних виїмок в корпусі зарядів. При цьому доставка зарядів до вибою ускладнена конструкцією ріжучого інструменту шарошкового типу. Розташування зарядів обмежує область впливу енергії вибуху контуром виробки.

Третій патент щодо комбінованого вибухо-механічного руйнування ГП [17] включає введення зарядів ВР по промивному каналу до вибою. Детонацію зарядів забезпечують п'єзоелектричні елементи. Внаслідок цього відбувається подрібнення ГП вибухом з послідуємим механічним оконтуренням вибою та виносом зруйнованої ГП на поверхню потоком промивної рідини. Основним недоліком є те, що концентрація вертикального напрямку вибухової хвилі забезпечується її відбиванням від різців робочого інструменту. Це спричиняє розсіювання енергії вибуху, та, відповідно, знижує ефективність ВР. Крім цього, основним руйнівним чинником є енергія вибуху, а різці лише надають вибою округлої форми, зрізуючи породу по контуру свердловини.

Запропоноване вибухо-механічне руйнування ГП передбачає поєднання руйнівних чинників: тиск до 40 ГПа [18], температуру до 5000 К [18], швидкість навантаження до 10 км/с [18]. Також відомо [19], що під час вибуху виникають електромагнітні коливання внаслідок електрокінетичного явища. Згідно з [19] частота електромагнітних коливань продуктів детонації сягає діапазону \approx від 300 ГГц до 300 ПГц. Тиск вибухової хвилі, як і будь-яке механічне навантаження формує ядро ущільнення ГП. Але енергія

вибуху є хвилеподібною, і тиск має динамічні ознаки – вплив з певною частотою (ефект перфоратора). Таким чином кожне максимальне навантаження чергується його падінням, під час якого ГП зменшується і руйнується.

Швидкість вибухової хвилі еквівалентна швидкості прикладання механічного навантаження. Відомо [20], що зі зростанням швидкості навантаження пластичні деформації не встигають реалізуватись. Тому навіть пластичні тіла мають ознаки крихкого руйнування. Так, енергія вибуху залишається ефективною в умовах прошарків в'язких та пластичних ГП. Швидкість вибухової хвилі також сприяє глибшому прониканню продуктів детонації у природні тріщини. Розповсюджуючись в існуючих тріщинах, продукти детонації формують систему технологічних тріщин.

Температура продуктів детонації безпосередньо не несе руйнівного ефекту. Різка підвищення температури призводить до стрімкого підвищення руйнівних чинників: тиску та швидкості вибухової хвилі. Крім того вплив температури під час вибуху є імпульсним, разовим і протікає за доли секунди. Тому теплова енергія в якості самостійного руйнівного чинника не встигає реалізуватись.

Електромагнітні коливання забезпечують руйнування ГП на мікроскопічному рівні. Відомо [21], що кристалічні решітки мінералів ГП мають власну частоту коливань, що не перевищує 10 ТГц. Наприклад гексагональна кристалічна решітка кварцу має ковалентний полярний зв'язок. Тобто атоми пов'язані між собою електронними парами. Електрони здійснюють власні коливання та мають електричний заряд. Відповідно формують навколо себе електромагнітне поле. Електромагнітні коливання продуктів детонації вступають в субрезонанс з власними коливаннями електронних пар. Відбувається «розхитування» міжатомних зв'язків, що призводить до їх розриву. Внаслідок цього утворюються дефекти кристалічної решітки та мікротріщини у ГП.

Руйнування ГП лише вибухом вимагає витрат ВР на рівні 28 кг/м³ [13]. Тому запропоновано енергію вибуху використовувати лише для формування технологічної тріщинуватості, додатково до природної. Послідує руйнування ГП забезпечить ріжучий інструмент механічної дії. Зниження витрат реалізується завдяки концентрації вибухової хвилі перпендикулярно до вибою. Отже ідеєю досліджень є використання властивостей продуктів вибуху з підвищення тиску внаслідок зростання температури (закон Шарля/Амонтана) та концентрації вибухової хвилі (ефект Манро) для зниження енергоємності руйнування.

ВИСНОВКИ. Згідно з результатами проведених досліджень запропоновано класифікаційну схему з орієнтовним графом Тудора Замфіреску, з якого виділено 132 комбінації способів руйнування ГП.

З метою зниження енергоємності механічного руйнування ГП необхідне його доповнення немеха-

нічним. У якості послаблюючого навантаження обрано вибухове, так як характеризується наступними чинниками: тиском продуктів вибуху (300–400 ГПа) [18]; швидкістю навантаження (10 км/с) [18], температурним фактором (5000 К) [18] та електромагнітними коливаннями (300 ГГц–300 ПГц) [19].

Розроблено комбіноване руйнування ГП вибухо-механічними навантаженнями. Відрізняється від відомих тим, що з часовим випередженням формують технологічну тріщинуватість вибою концентрованим потоком вибухової хвилі, після чого забезпечують механічне руйнування вже послабленого масиву по всій площі. Так, продукти вибуху, розширюючись, проникають у систему природних тріщин під тиском і зі швидкістю до 10 км/с [18]. Тиск газів тисне на стінки природних тріщин, розширюючи їх та створюючи систему технологічних тріщин. Сукупність природної та технологічної тріщинуватостей послаблює міцнісні характеристики ГП, унаслідок чого зменшуються енергоємність руйнування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Структура споживання електричної енергії по Україні. [Електронний ресурс] / Державне підприємство НЕК «Укренерго» – Режим доступу: [www/URL: http://www.ukrenergo.energy.gov.ua/ukrenergo/control/uk/publish/article?art_id=148095&cat_id=35380](http://www.ukrenergo.energy.gov.ua/ukrenergo/control/uk/publish/article?art_id=148095&cat_id=35380)
2. Тангаев И.А. Энергоемкость процессов добычи и переработки полезных ископаемых. – М.: Недра, 1986. – 231 с.
3. Буровое и горнотранспортное оборудование железнорудных карьеров России и стран СНГ / С.П. Решетняк, А.В. Самолазов, Н.И. Паладеева // Горная Промышленность. – 2009. – № 5. – 18 с.
4. Про затвердження Державної цільової економічної програми енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010–2015 роки [Електронний ресурс]: постанова КМУ від 01.03.10 р. 243. – Режим доступу: [www. URL: http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/243-2010-%D0%BF](http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/243-2010-%D0%BF)
5. Скрипченко Т.А. Буровой инструмент Atlas Sorco // Капстроительство. – 2012. – № 1. – С. 44–45.
6. Интенсификация процессов бурения с использованием гидродинамической кавитации / Н.А. Дзоз, Ю.А. Жулай // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 4. – С. 290–296.
7. Potter J.M. Development of a hydrothermal spallation drilling system for EGS [Electronic resource]. – U.S. Department of energy, 2010. – Available at: www. URL: http://energy.gov/sites/prod/files/2014/02/f7/high_potter_hydrothermal_spallation_drilling.pdf
8. U.S. patent 20120261188 A1, Int. cl. E21B 7/15, E21B 7/00. Method of high power laser-mechanical drilling / Zedicer M.S, Faircloth B.O, Allen E.C. – field 23.02.2012; issued 18.10.2012.
9. Acid Tunneling Technology: Application Potential in Timano-Pechora Carbonates [Electronic resource] / A. Akhukubekov, V. Vasiliev. – Society of Petroleum Engineers, 2010. – Available at: www/URL: http://dx.doi.org/10.2118/135989-MS.
10. Acid-Tunneling technique shows success in carbonates / L. Portman, A. Bouarki, M. Navarro // Journal of petroleum technology. – 2008. – № 11. – PP. 28–31.
11. Acidizing fundamentals / J.L. Gidley, R.S. Schechter, B.B. Williams. – New York: Monograph Doherty Series, SPE of AIME, 1979. – 124 p.
12. Зыков А.А. Основы теории графов. – М.: Наука, 1987. – 383 с.
13. Островский А.П. Новые процессы бурения глубоких скважин. – М.: Гос. научно-техн. изд-во нефтяной и горно-топливной лит-ры, 1960. – 187 с.
14. Advanced drilling systems study / K.G. Pierce, B.J. Livesay, J.T. Finger. – Office of Scientific and Technical Information: U.S. Department of energy, 1996. – 163 p. doi: 10.2172/892770
15. U.S. Patent 3083778, Int. cl. E21B 7/00, F42D 01/00, F42D 01/10. Rotary drilling of wells using explosives / Friedman R.H., Robinson L.H., Edwards J.H. – field 26.05.1960; issued 02.04.1963.
16. U.S. Patent 3130797, Int. cl. E21B 7/00. Methods and apparatus for drilling bore holes / Ford J. – field 31.01.1961; issued 28.04.1964.
17. U.S. Patent 3576219, Int. cl. E21B 7/00, E21C 19/00. Method and apparatus for explosive drilling utilizing spark pumps for detonating explosives / Frank A. – field 08.09.1969; issued 27.04.1971.
18. Ершов А.П. Взрыв // Соросовский образовательный журнал. – 2000. – Т. 6. – С. 85–90.
19. Баум Р.А. Физика взрыва; под ред. Л.П. Орленко. – Изд. 3-е. – В 2 т. Т. 2. – М.: Физматлит, 2002. – 656 с.
20. Федосеев В.И. Сопrotивление материалов. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. – 592 с.
21. Прохоров А.М. Колебания кристаллических решеток. – М.: Советская энциклопедия, 1984. – 944 с.

FORMATION OF THE COMBINED METHOD OF ROCKS DESTRUCTION WITH EXPLOSIVE-MECHANICAL MEANS

O. Terentiev, P. Gontar

Institute of Energy Saving and Energy Management

vul. Borshagivska 115, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: oltr_1@ukr.net

Systematic analysis results on combined methods of rocks fracturing were showed. The new classification of combined stressing on working face was suggested. The theory of graphs was used to classify methods of rocks fracturing. Tudor Zmfiresku's graph was chosen due to its maximum quantity of edges (relations) between every node. The node stands for a method of rock fracturing. For this reason edges are making up combined methods. This helped to determine 132 possible combinations of methods. Thus the reasonable combination of mechanical (rotary) and nonmechani-

cal (explosive) sources of fracturing energies was suggested. It was determined that explosive energy includes such destruction parameters as loading speed, pressure of gases, temperature and electromagnetic fluctuations. Including Munroe effect there is a controlled explosive energy that impacts a working face adding technological fractures to natural one. Thus rocks lose their solid properties and they become easier to cut by mechanical means. Therefore the combination serves for a specific energy decreasing due to preliminary rocks weakening with technological fracturing added to natural fracturing.

Key words: combined fracturing, physical-mechanical stressing; rocks weakening; technological fracturing, energy intensity of fracturing, explosive-mechanical fracturing.

REFERENCES

1. Struktura spozhivannya elektrichnoyi energiyi po Ukraini. Derzhavne pidpriemstvo NEK «Ukrenergo». Available: http://www.ukrenergo.energy.gov.ua/ukrenergo/control/uk/publish/article?art_id=148095&cat_id=35380
2. Tangaev, I. A. (1986). *Energoemkost protsessov dobychi i pererabotki poleznyih iskopaemyih*. Moscow: Nedra, 231.
3. Reshetnyak, S.P., Samolazov, A.V., Paladeeva, N.I. (2009). "Boring and mine transport equipment of iron-ore quarries of Russia and countries the CIS", *Mining Industry*, no. 5, 18 p.
4. *Pro zatverdzhennya Derzhavnoyi tsilovoyi ekonomichnoyi programi energoefektivnosti i rozvitku sferi virobnytstva energonosiyiv z vidnovlyuvanih dzherel energiyi ta alternativnih vidiv paliva na 2010-2015 roki: postanova KMU vid 01.03.10 r. 243*. Available: <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/243-2010-%D0%BF>
5. Skrypchenko, T.A. (2012). Drilling Tools Atlas Copco, *Capital construction*, no. 1, pp. 44–45.
6. Dzo, N.A., Zhulay, Yu.A. (2008). Intensification of drilling with use of either hydrodynamic cavitation, *Minnig information-analytical bulletin*, no. 4, pp. 290–296.
7. Potter, J.M. (2010). *Development of a hydro-thermal spallation drilling system for EGS*, U.S. Department of energy. Available: http://energy.gov/sites/prod/files/2014/02/f7/high_potter_hydrothermal_spallation_drilling.pdf
8. Zedicer, M. S., Faircloth, B. O., Allen, E. C. (18.10.2012). U.S. patent 20120261188 A1, Int. cl. E21B 7/15, E21B 7/00. *Method of high power laser-mechanical drilling*. Field 23.02.2012.
9. Akhkubekov, A., Vasiliev, V. (2010). Acid Tunneling Technology: Application Potential in Timano-Pechora Carbonates. Society of Petroleum Engineers, 2010. Available: <http://dx.doi.org/10.2118/135989-MS>.
10. Portman, L., Bouarki, A., Navarro, M. (2008) Acid-Tunneling technique shows success in carbonates. *Journal of petroleum technology*, no. 11, pp. 28–31.
11. Gidley, J.L., Schechter, R.S., Williams, B.B. (1979) *Acidizing fundamentals*, New York: Monograph Doherty Series, SPE of AIME.
12. Zykov, A.A. (1987) *Osnovyi teorii grafov* [Fundamentals of graph theory], Nauka, Moscow, Russia.
13. Ostrovskiy, A.P. (1960). *Novyie protsessyi bureniya glubokih skvazhin* [New processes of drilling deep wells], State Scientific and Technical. ed of the oil, mining and fuel of literature, Moscow, Russia.
14. Pierce, K. G., Livesay, B. J., Finger, J. T. (1996). *Advanced drilling systems study*. Office of Scientific and Technical Information: U.S. Department of energy, 163. doi: 10.2172/892770
15. Friedman, R. H., Robinson, L. H., Edwards, J. H. (02.04.1963). U.S. Patent 3083778, Int. cl. E21B 7/00, F42D 01/00, F42D 01/10. *Rotary drilling of wells using explosives*. Field 26.05.1960.
16. Ford, J. (28.04.1964). U.S. Patent 3130797, Int. cl. E21B 7/00. *Methods and apparatus for drilling bore holes*. Field 31.01.1961.
17. Frank, A. (27.04.1971). U.S. Patent 3576219, Int. cl. E21B 7/00, E21C 19/00. *Method and apparatus for explosive drilling utilizing spark pumps for detonating explosives*. Field 08.09.1969.
18. Ershov, A.P. (2000) Explosion, *Soros Educational Journal*, no. 6, pp. 85–90.
19. Baum, R.A. (2002) *Fizika vzryva* [Physics of the explosion], ed. L.P. Orlenko, ed. 3rd., in 2 vol. vol. 2, Fizmatlit, Moscow, Russia.
20. Fedoseev, V. I. (1999) *Soprotivlenie materialov* [Strength of Materials], MSTU. Bauman, Moscow, Russia.
21. Prohorov, A.M. (1984) *Kolebaniya kristallicheskikh reshetok* [Vibrations of crystal lattices], Soviet encyclopedia, Moscow, Russia.

Стаття надійшла 30.11.2014.