

П. А. ГОНТАРЬ, аспірант
О. М. ТЕРЕНТЬЕВ, д-р техн. наук, професор;
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

ЭНЕРГОЕМКОСТЬ ВЗРЫВО - МЕХАНИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Предложен выбор комбинированного разрушения горных пород (ГП) с целью снижения удельной энергоемкости механического разрушения. Для классификации комбинированных способов применена теория графов. Выбран ориентированный граф Понтрягина-Куратовского II-го рода с 12-ю вершинами. Построена бинарная матрица совместимости способов разрушения ГП. Обосновано дополнение механического разрушения взрывным как одним из наиболее энерговооруженных. Для реализации взрыво-механического разрушения представлен стенд экспериментальной установки с модифицированными узлами и элементами. Описан принцип действия взрыво-механического разрушения на примере, разработанного резца комбинированного воздействия. В результате математического моделирования комбинированного разрушения ГП взрыво-механическими нагрузками проведены предпроектные исследования. Результаты оформлены в виде графиков для гранита, кварцита и песчаника. Проведен анализ полученных зависимостей.

Ключевые слова: комбинированное разрушение, взрыво-механические нагрузки, математическая модель, разрушение горных пород, технологическая трещиноватость, энергоемкость разрушения.

Вступление

Более 10 % электроэнергии [1], вырабатываемой в странах СНГ, расходуется на разрушение и дробление ГП. За период 2012 года горная промышленность потребила 12 млрд. кВт·ч [2]. Формирование скважин на 90 % обеспечивают станки шарошечного типа [3]. При этом темпы разрушения достигли максимума и дальнейшая оптимизация практически невозможна. Поэтому проводятся поиски возможностей дополнения механических нагрузок немеханическими с целью снижения энергоемкости разрушения ГП. Актуальность исследований подтверждена Законом «О приоритетных направлениях инновационной деятельности в Украине» от 05.12.12 № 3715-17, где на период 2011-2021 годы планируется «...внедрение энергоэффективных, ресурсосберегающих технологий, освоение альтернативных источников энергии» [4].

Целью исследований является снижение энергоемкости удельной энергоемкости процесса разрушения ГП за счет дополнения к естественной технологической трещиноватости. Идея работы состоит в использовании закона Шарля/Амонтона [5] для снижения энергоемкости разрушения ГП. Для достижения цели поставлены следующие задания:

- выбор и обоснование эффективности разрушения ГП в условиях комбинированных физико-механического нагружения;
- формирование математической модели комбинированного разрушения ГП, которая отличается от известных тем, что учитывает совокупность взрывных и механических нагрузок;
- экспериментальные исследования влияния импульсного формирования технологической трещиноватости массива ГП на энергоемкость механического разрушения.

Материалы и результаты исследований

Немеханические способы разрушения ГП отличаются от механических отсутствием породоразрушающего инструмента, роль которого возрастает с прочностью ГП вследствие износа. Недостатками применения немеханических способов являются: необходимость соответствующих горно-геологических условий, ГП с определенными физическими свойствами; расход электроэнергии 100 ... 200 кВт·ч/м³ [1], износ резцов, практическая невозможность оптимизации. Чтобы устранить недостатки и усилить достоинства необходимо создать комбинированный способ разрушения ГП. В результате достигается возможность эффективного разрушения ГП в различных горно-геологических условиях с различными физическими свойствами.

Для анализа комбинированных способов разрушения ГП применена теория графов [6]. Выбран ориентированный граф Понтрягина-Куратовского II-го рода с 12-ю вершинами (рисунок 1). Каждая вершина соответствует отдельному способу разрушения ГП единичной нагрузкой. Нестрогие параллельные дуги графа соединяют между собой вершины в двух направлениях, формируя двойные комбинации с каждой парой способов разрушения ГП.

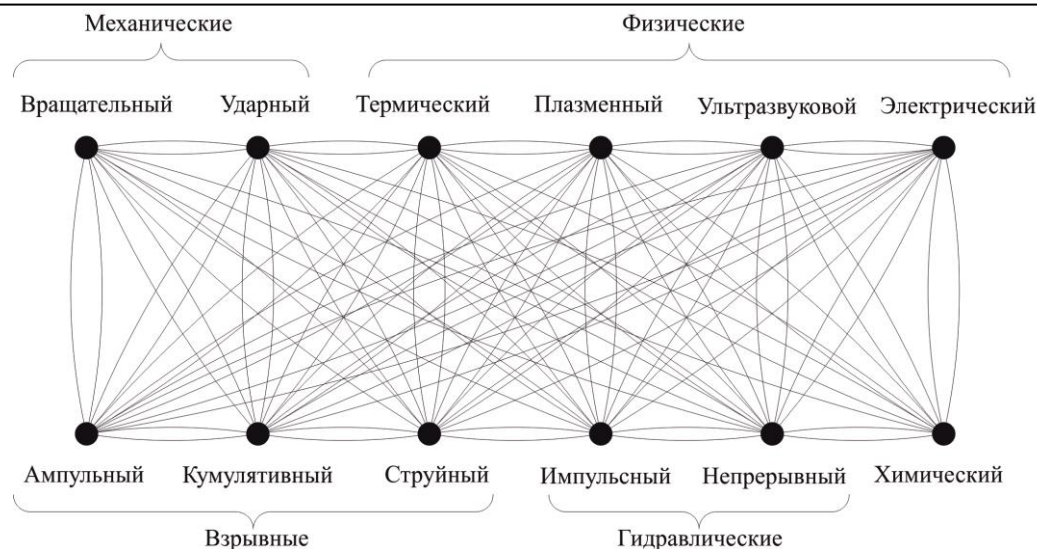


Рисунок 1 – ориентированный граф Понтрягина-Куратовского II-го рода для классификации комбинированных способов разрушения ГП

Для определения возможных комбинаций способов разрушения ГП построено бинарную матрицу к графу (рисунок 2).

	О	Уд	Т	П	У	Е	А	К	С	І	Б	Х
О	О	О-Уд	О-Т	О-П	О-У	О-Е	О-А	О-К	О-С	О-І	О-Б	О-Х
Уд	Уд-О	Уд	Уд-Т	Уд-П	Уд-У	Уд-Е	Уд-А	Уд-К	Уд-С	Уд-І	Уд-Б	Уд-Х
Т	Т-О	Т-Уд	Т	Т-П	Т-У	Т-Е	Т-А	Т-К	Т-С	Т-І	Т-Б	Т-Х
П	П-О	П-Уд	П-Т	П	П-У	П-Е	П-А	П-К	П-С	П-І	П-Б	П-Х
У	У-О	У-Уд	У-Т	У-П	У	У-Е	У-А	У-К	У-С	У-І	У-Б	У-Х
Е	Е-О	Е-Уд	Е-Т	Е-П	Е-У	Е	Е-А	Е-К	Е-С	Е-І	Е-Б	Е-Х
А	А-О	А-Уд	А-Т	А-П	А-У	А-Е	А	А-К	А-С	А-І	А-Б	А-Х
К	К-О	К-Уд	К-Т	К-П	К-У	К-Е	К-А	К	К-С	К-І	К-Б	К-Х
С	С-О	С-Уд	С-Т	С-П	С-У	С-Е	С-А	С-К	С	С-І	С-Б	С-Х
І	І-О	І-Уд	І-Т	І-П	І-У	І-Е	І-А	І-К	І-С	І	І-Б	І-Х
Б	Б-О	Б-Уд	Б-Т	Б-П	Б-У	Б-Е	Б-А	Б-К	Б-С	Б-І	Б	Б-Х
Х	Х-О	Х-Уд	Х-Т	Х-П	Х-У	Х-Е	Х-А	Х-К	Х-С	Х-І	Х-Б	Х

Рисунок 2 – Бинарная матрица совместимости способов разрушения ГП.

Согласно с бинарной матрицей возможны 132 комбинации способов разрушения ГП. Использование нестрого параллельного графа позволяет удвоить количество комбинаций (264 способов) за счет двойных направлений дуг. Например, ударный и крутящий способы формируют ударно - вращательный и вращательно-ударный.

Среди немеханических способов разрушения взрыв является одним из наиболее энерговооруженных. Ударная волна объединяет следующие факторы: давление до 20,5 ... 36,0 ГПа [7]; температуру продуктов детонации 3600 ... 5100 К [7]; скорость ударной волны до 10 км/с [8]. Так же известно [8], что во время взрыва возникают электромагнитные колебания, в результате электрокинетических явлений. Частота колебаний достигает ≈ 300 ГГц [8]. Поэтому энергию взрыва целесообразно применять в качестве ослабляющей, с целью снижения энергоемкости механического вращательного разрушения ГП. Взрывная волна с временным опережением дополняет естественную трещиноватость технологической, что приводит к снижению прочностных характеристик ГП. Соответственно снижается нагрузка на резец и затраты энергии на механическое разрушение.

Для реализации взрыво-механического разрушения ГП разработан экспериментальный стенд (рисунок 3) на базе типовой установки с модифицированными узлами и элементами. Используются

следующие чувствительные элементы: карбоновые резисторы, собранные в мост Уитстона [9] (измерение давления взрывной волны); объектив пирометра (измерение температуры продуктов детонации); система коаксиальных антенн с оголенными средними жилами (измерение скорости взрывной волны).

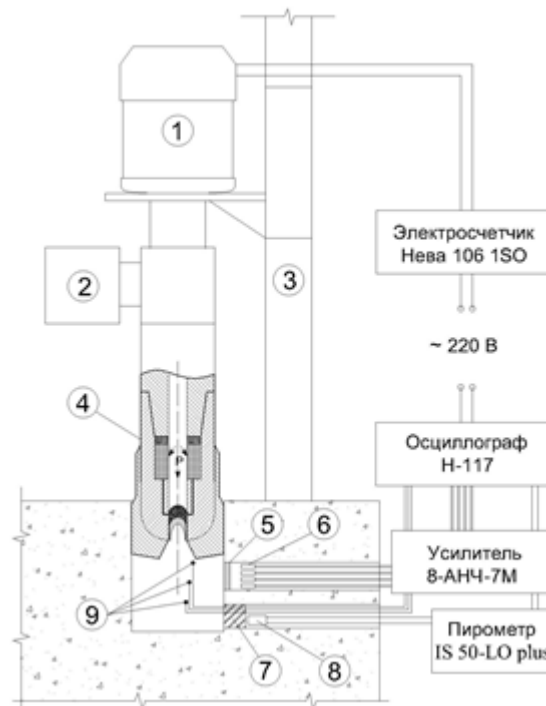


Рисунок 3 - Схема экспериментальной установки для комбинированного разрушения ГП взрыво-механическими нагрузками (1 - электродвигатель, 2 - вертлюг 3 - элементы каркаса 4 - режущий инструмент взрыво-механического действия, 5 - защитный экран, 6 - тензодатчики 7 - органическое стекло, 8 - объектив пирометра, 9 - система антенн.)

Один из вариантов реализации взрыво-механического разрушения ГП представлен на рисунке 4.

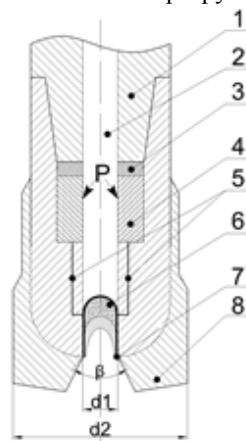


Рисунок 4 – Модифицированный резец взрыво-механического действия.

Через продувной канал 2 нагнетается воздух и осуществляется доставка заряда 6 ВВ к забою. Заряд фиксируется кольцом 7, блокируя поток воздуха. В результате увеличивается внутреннее давление. Достигнув минимально-допустимого значения, пьезоэлементы 4 деформируются, возникает электрический разряд, который посредством электродов 5 и детонатора инициирует взрыв. Взрыв обеспечивает формирование технологической трещиноватости. После твердосплавные резцы 8 разрушают ГП, ослабленную технологической и естественной трещиноватостью.

При аналитическом исследовании определены зависимости (рисунок 5): энергоемкость разрушения ГП от:

- частоты электромагнитных колебаний $e = f(\nu)$. **Участок 1** - 200 ... 300 ГГц отмечается экспоненциальным падением энергоемкости с 60 до 40 кВт·ч/м³ - преобладание упругих свойств массива ГП, вследствие отсутствия технологической трещиноватости. **Участок 2** - 300 ... 400 ГГц происходит

сглаживание зависимости с пологим падением функции - ГП уже ослаблены технологической трещиноватостью, что вызывает затухание колебаний, вследствие отсутствия резонанса.

- скорости взрывной волны $e = f(u)$. **Участок 1** - пологий отрезок от 2 до 4 км/с, - начальное уплотнение ГП вызывает сопротивление деформациям; **участок 2** - ниспадающий отрезок в диапазоне 4 ... 8 км/с - энергия взрыва имеет волнообразную форму и каждый пик нагрузки чередуется его падением, при котором ГП разупрочняются, то есть уменьшается сопротивление деформациям и начинается процесс разрушения; **участок 3** - пологий отрезок за отметкой 10 км/с - уже сформирована технологическая трещиноватость и возрастание скорости приложения нагрузки приводит к измельчению ГП.

- массы заряда взрывчатого вещества $e = f(m)$. **Участок 1** - от 0 до 0,4 кг характеризуется резким снижением энергоемкости разрушения - увеличение потенциальной энергии взрыва, а следовательно и разрушительного эффекта; **участок 2** - от 0,4 до 1,0 кг отмечается сглаживанием функции - плотность заряда остается неизменной и увеличение массы происходит за счет его размера, что приводит к рассеиванию кинетической энергии продуктов детонации. Кроме этого в условиях крепких пород частота колебаний ударных импульсов возрастает, а продолжительность их действия уменьшается. Поэтому глубина проникания взрывной волны ограничивается и увеличение массы заряда на этом участке является неэффективным, так как влияет не на глубину проникновения, а на величину измельчения поверхностного слоя ГП.

- температуры продуктов детонации $e = f(T)$. Прямолинейная регрессивная зависимость отражает незначительное снижение энергоемкости разрушения ГП. Это объясняется снижением скорости распространения продольных и поперечных волн с увеличением температуры ГП.

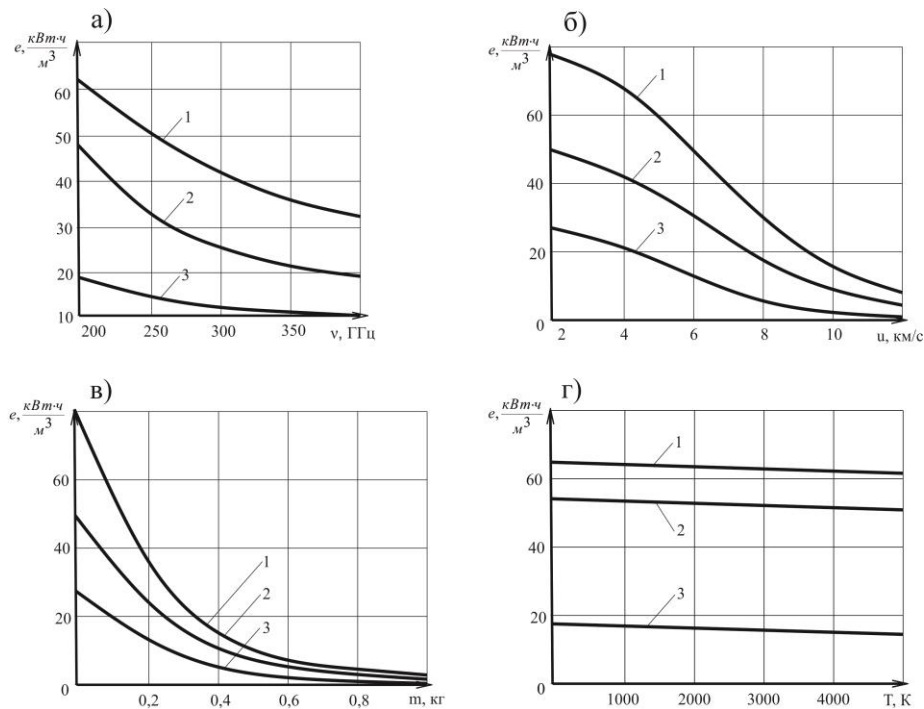


Рисунок 5 - Зависимости энергоемкости разрушения ГП (1 - гранит, 2 - кварцит 3 - песчаник) от: а - частоты электромагнитных колебаний; б - скорости кумулятивной струи; в - массы заряда взрывчатого вещества; г - температуры продуктов взрыва.

Выводы

1. Предложена классификационная схема с 12-вершинным графом, из которого выделено 314 комбинации двух способов разрушения. Разработан энергосберегающий взрыво - механический способ разрушения ГП.
2. Разработана математическая модель комбинированного разрушения горных пород взрыво - механическими нагрузками, которая отличается от известных тем, что учитывает, давление и скорость воздействия взрывной волны, температуру и электромагнитные колебания продуктов детонации.
3. Установлены и проверены следующие зависимости:

- экспоненциальная зависимость энергоёмкости разрушения ГП от частоты электромагнитных колебаний. Энергоёмкость снизилась с 60 до 30 кВт·ч/м³, то есть на 50 %;

- экспоненциальная зависимость энергоёмкости разрушения ГП от массы заряда взрывчатого вещества. Энергоёмкость снизилась с 80 до 15 кВт·ч/м³, или на 80 %;

- спадающая логарифмически - экспоненциальная зависимость энергоёмкости разрушения ГП от скорости приложения нагрузки. Энергоёмкость снизилась с 78 до 15 кВт·ч/м³, или на 80 %.

4. Для проведения экспериментальных исследований разработана конструкция режущего инструмента и заряда взрывчатого вещества каскадного типа. Подобраны и обоснованы измерительные приборы с чувствительными элементами для проверки аналитических зависимостей.

Литература

1. Тангаев И. А. Энергоёмкость процессов добычи и переработки полезных ископаемых [Текст] / И. А. Тангаев. – М.: Недра, 1986. - 231 с.
2. Структура споживання електричної енергії по Україні. [Электронный ресурс] / Державне підприємство НЕК «Укренерго» – Режим доступу: http://www.ukrenergo.energy.gov.ua/ukrenergo/control/uk/publish/article?art_id=129077&cat_id=35380
3. Решетняк С. П. Буровое и горнотранспортное оборудование железнорудных карьеров России и стран СНГ [Текст] / С. П. Решетняк, А. В. Самолазов, Н. И. Паладеева // Горная Промышленность – 2009. - №5 - 18 с.
4. Закон України про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні. [Электронный ресурс] / Верховна Рада України – Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/3715-17>
5. Закон Шарля/Амонтона [Электронный ресурс] / Википедия. Свободная энциклопедия. Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD_%D0%A8%D0%B0%D1%80%D0%BB%D1%8F
6. Зыков А. А. Основы теории графов [Текст] / А. А. Зыков — М.: Наука, 1987. — 383 с.
7. Ершов А. П. Взрыв [Текст] / А. П. Ершов // Соросовский образовательный журнал. – 2000. – Т. 6. – С. 85-90.
8. Баум Р.А. Физика взрыва [Текст] / Под ред. Л. П. Орленко. – Изд. 3-е. – В 2 т. Т. 2 - М. : Физматлит, 2002. – 656 с. ISBN 5-9221-0220-6.
9. Измерительный мост. [Электронный ресурс] / Википедия. Свободная энциклопедия. – Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%B7%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%BC%D0%BE%D1%81%D1%82 – 05.03.2014 г. – Загл. с экрана.

P. GONTAR, postgraduate student

O. TERENTIEV, D.Sc., Ass.Prof

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

ROCKS DESTRUCTION ENERGY CONSUMPTION WITH EXPLOSIVE-MECHANICAL MEANS

The choice of rocks combined destruction for the purpose of energy consumption decrease of mechanical destruction is offered. The theory of graphs is applied for combined methods classification. It is chosen Pontryagina-Kuratowski's graph with 12 tops. The binary matrix of compatibility of rocks destruction methods is constructed. In addition to mechanical destruction an explosive is proved as one of the most power armed. For explosive-mechanical destruction implementation the stand of experimental installation with the modified elements is presented. An explosive-mechanical destruction principle is described on the example of developed cutter of the combined influence. As a result of mathematical modeling of the combined destruction predesign researches are conducted. Results are issued in the form of schemes for granite, quartzite and sandstone. The analysis of the received dependences is carried out.

Key words: combined destruction, explosion-mechanical stressing, mathematical model, rocks destructions, technological fracturing, energy intensity of destruction.

1. Tangaev I. A. Power consumption of minerals production and processing processes [Text] / I. A. Tangaev. – М.: Nedra, 1986. - 231 s.
2. Energy consumption structure in Ukraine. [Electronic resource] / Derzhavne pidpriemstvo nek «Ukrenergo» – Access mode: http://www.ukrenergo.energy.gov.ua/ukrenergo/control/uk/publish/article?art_id=129077&cat_id=35380.
3. Reshetnyak S. P. Drilling and mining-transport equipment of iron-ore pits in Russia and CIS countries [Text] / S. P. Reshetnyak, A. V. Samolazov, N. I. Paladeeva // Mining industry – 2009. - №5 - 18 s.
4. The Law of Ukraine on priority directions of innovative activity in Ukraine. [Electronic resource] / Verhovna Rada Ukraini – Access mode: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/3715-17>.

5. Charle's/Amonton's law [Electronic resource] / Wikipedia. The Free Encyclopedia. Access mode: http://ru.wikipedia.org/wiki/%d0%97%d0%b0%d0%ba%d0%be%d0%bd_%d0%a8%d0%b0%d1%80%d0%bb%d1%8f.
6. Zykov A. A. Fundamentals of the graphs' theory [Text] / A. A. Zykov — М.: Nauka, 1987. — 383 с.
7. Ershov A. P. Explosion [Text] / A. P. Ershov // Soros's overview journal. — 2000. — т. 6. — с. 85-90.
8. Baum P.A. Physics of explosion [Text] / Pod red. I. p. orlenko. — izd. 3-e. — v 2 t. t. 2 - М. : Fizmatlit, 2002. — 656 s. isbn 5-9221-0220-6.
9. Measuring bridge. [Electronic resource] / Wikipedia. The Free Encyclopedia. — Access mode: http://ru.wikipedia.org/wiki/%d0%98%d0%b7%d0%bc%d0%b5%d1%80%d0%b8%d1%82%d0%b5%d0%bb%d1%8c%d0%bd%d1%8b%d0%b9_%d0%bc%d0%be%d1%81%d1%82 — 05.03.2014 g.

П. А. ГОНТАРЬ, аспірант,

О. М. ТЕРЕНТЬЄВ, д-р техн. наук, професор;

**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»
ЕНЕРГОЄМНІСТЬ ВИБУХО-МЕХАНІЧНОГО РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД**

Запропоновано вибір комбінованого руйнування гірських порід (ГП) з метою зниження питомої енергоємності механічного руйнування. Для класифікації комбінованих способів застосована теорія графів. Обрано орієнтовний граф Понтрягіна-Куратовського II-го роду з 12-ма вершинами. Побудована бінарна матриця сумісності способів руйнування ГП. Обґрунтовано доповнення механічного руйнування вибуховим як одним з найбільш енергоозбросних. Для реалізації вибухо-механічного руйнування представлено стенд експериментальної установки з модифікованими вузлами та елементами. Описано принцип дії вибухо-механічного руйнування на прикладі, розробленого різця комбінованої дії. В результаті математична моделювання комбінованого руйнування ГП вибухо- механічними навантаженнями проведені допроектні дослідження. Результати оформлені у вигляді графіків для граніту, кварциту і пісковіку . Проведено аналіз отриманих залежностей.

Ключові слова: комбіноване руйнування , вибухо-механічні навантаження, математична модель, руйнування гірських порід, технологічна тріщинуватість, енергоємність руйнування.

УДК 622.23.05

І. В. ЗАХАРОВА, аспірант

С. П. ШЕВЧУК, професор, д-р техн. наук,

В. М. СЛІДЕНКО, доцент, канд. техн. наук.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут

ІМПУЛЬСНО-ВІБРАЦІЙНЕ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД

Анотація. Розглянуто імпульсно-вібраційний спосіб руйнування гірських порід з міцністю $f > 8$ за шкалою проф. М.М. Протодьяконова, на основі взаємодії обертального буріння, імпульсів в діапазоні частот 3...5 Гц, та вібраційного навантаження електрострикційним методом з частотою 100...250 Гц, яка сприяє зниженню питомої енергоємності руйнування та зменшенню зносу бурового інструменту. Для обґрунтування доцільності застосування способу наведено механізм утворення ядра ущільнення при статичних та динамічних навантаженнях, представлені розрахунки питомої енергоємності для процесу різання вугілля та гірської породи.

Ключові слова: електрострикційний вібратор, обертальне буріння, імпульсне навантаження, буріння шпурів.

Вступ

Найбільш поширеним способом відділення від масиву порід середньої міцності і міцних на сучасному рівні гірничо-прохідницької техніки є буропідрильний спосіб. Проте, якщо застосування вибухових речовин, які вводяться усередину масиву породи, дозволяє в долі секунди відокремлювати значні обсяги гірської породи, то буріння шпурів, необхідних для розміщення в масиві зарядів вибухових речовин, є однією з найбільш трудомістких операцій при проведенні підготовчих виробок, що складає 25–40 % загальних трудовитрат на всі роботи виробничого циклу і 55–60 % вартості всіх прохідницьких робіт при буропідрильному способі проведення виробок.

На сьогодні встановлені наступні області застосування різноманітних способів механічного буріння шпурів діаметром 32-52 мм: обертальне буріння доцільно застосовувати при неабразивних породах з $f < 8$; обертально-ударне буріння рекомендується в породах з $f = 8-16$; ударно-обертальне буріння