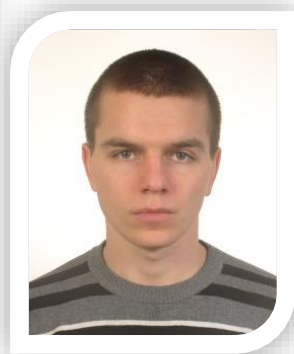


SECTION 5. Innovative technologies in science



Terentiev Oleg Markovich
Doctor of science, Professor
Electromechanical Energy-Intensive Equipment Department
National Technical University of Ukraine
“Kyiv Polytechnic Institute”
OLTR_1@ukr.net



Gontar Paul Anatolievich
Post graduate student
Electromechanical Energy-Intensive
Equipment Department
National Technical University of Ukraine
“Kyiv Polytechnic Institute”
gontar.co@gmail.com

MATHEMATICAL MODEL OF COMBINED ROCK DESTRUCTION WITH EXPLOSION-MECHANICAL MEANS

Abstract: *The mathematical model of combined rock destruction with explosion-mechanical means was presented. The analytic research result was stated. The analysis of received dependences had been made.*

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

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОМБИНИРОВАННОГО РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ВЗРЫВО-МЕХАНИЧЕСКИМИ НАГРУЗКАМИ

Аннотация: *Представлена математическая модель комбинированного разрушения горных пород взрыво-механическими нагрузками. Изложены результаты аналитического исследования относительно проверки математической модели. Проведен анализ полученных результатов.*

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

Вступление. Для энергоэффективного разрушения горных пород (ГП) необходимо обеспечить резонансные колебания их структурных элементов, сочетанием внешних и внутренних напряжений. Известные критерии разрушения [1-17] недостаточно описывают подобные процессы. Основными недостатками большинства критериев являются: наличие только одной нагрузки, отсутствие влияния: скорости приложения нагрузки, электромагнитных колебаний, температурного фактора на характер разрушения ГП. Итак, актуальной проблемой сегодня является снижение удельной энергоёмкости разрушения горных пород за счет комбинированного воздействия взрывных и механических нагрузок.

Изложение основного материала. Разрушение ГП комбинированными взрыво - механическими нагрузками обеспечивает формирование комплексной трещиноватости. То есть энергия взрыва, дополнительно к естественной, формирует технологическую трещиноватость. Для уточнения процесса взрыво - механического разрушения ГП разработана математическая модель (1), которая позволила проводить предпроектные расчеты разрушения ГП комбинированным взрыво – механическим способом.

$$e = \frac{N}{q} \cdot \frac{1}{v} \cdot \exp \left(\frac{U_0 \cdot \rho \cdot q \cdot M_{SiO_2}^{-1} - 0,5 \cdot m \cdot \left[\frac{p_{np} \cdot u_0^2}{p \cdot [1 + (\alpha_1 \cdot \rho_2) / (\alpha_2 \cdot \rho_1)]^2} \right] - 0,5 \cdot \sum i \cdot k \cdot T \cdot N_A \cdot \frac{m}{M}}{U_{mex}} \right), \quad (1)$$

где e – удельная энергоёмкость комбинированного разрушения ГП, Вт·ч/м³; $N = 26000$ – мощность, необходимая для разрушения 1 м³ песчаника, [18, с. 56], Вт; $q = 0,004$ – объем ГП, подвержен разрушению, согласно с экспериментальным образцом, м³; $v = 300$ – частота электромагнитных колебаний во время взрыва, [19, с. 351], ГГц; $U_0 = 12536550$ – энергия кристаллической решетки SiO₂ что составляет основу песчаника, [20, с. 60], расчет согласно Ферсману А. Е., Дж/моль; $\rho_2 = 2250$ – плотность песчаника, [21, с. 66], кг/м³; $M_{SiO_2} = 0,06$ – молярная масса SiO₂, [22, с. 8], кг/моль; $m = 0,05$ – масса заряда взрывчатого вещества, согласно с конструкцией, разработанного режущего инструмента комбинированного действия, кг; $p = 19,62 \cdot 10^4$ – давление кумулятивной струи, [23, с. 530], МПа; $u_0 = 2000 \dots 11850$ – скорость головной части кумулятивной струи, [23, с. 530], м/с; $p_{np} = 200$ – предел прочности при сжатии кремнистого песчаника, [24, с. 9], МПа; $\alpha_1 = 0,07$ – коэффициент сжимаемости кумулятивной струи, [25, с. 75], значение принято для меди, так как согласно с [26, с. 278] коэффициент сжимаемости у расплавов с точностью до 2 такой как и у твердых металлов, МПа⁻¹; $\rho_1 = 8900$ – плотность медной кумулятивной струи, [19, с. 223], кг/м³; $\alpha_2 = 3,72$ – коэффициент сжимаемости песчаника, [27, с. 164], МПа⁻¹; $\sum i = 5+5+6 = 16$ – сумма степеней свободы продуктов взрыва тротила соответственно СО, Н₂О, N₂, [28, с. 75], о.е.; $k = 1,3806488 \cdot 10^{-23}$ – постоянная Больцмана, Дж/К; $T = 773 \dots 1173$ – температура продуктов детонации, [23, с. 492], К; $N_A = 6,0221412 \cdot 10^{23}$ – число Авогадро, моль⁻¹; $M = 0,22$ – молярная масса тротила, [29, с. 62], кг/моль; $U_{mex} = 177,60$ – работа, необходимая на механическое разрушение ГП, [18, с. 39], МДж.

Согласно расчету, энергоёмкость разрушения песчаника, предложенным способом, составляет 6255 Вт·ч/м³ сравнительно с 26000 Вт·ч/м³ при механическом разрушении.

При аналитическом исследовании определены зависимости: энергоёмкость разрушения ГП от:

- частоты электромагнитных колебаний $e = f(v)$
- скорости взрывной волны $e = f(u)$;
- массы заряда взрывчатого вещества $e = f(m)$;
- температуры продуктов детонации $e = f(T)$ рисунок 1.

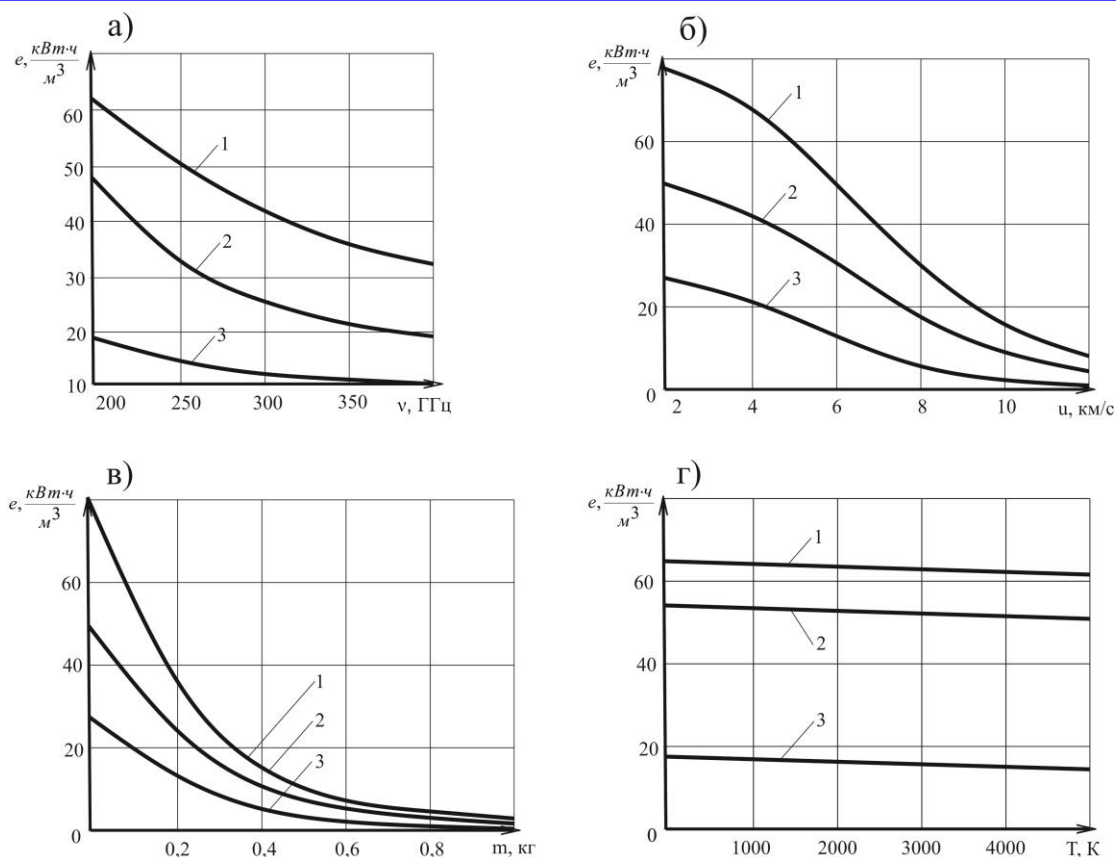


Рисунок 1 - Зависимости энергоемкости разрушения ГП (1 - гранит, 2 - кварцит 3 - песчаник) от: а - частоты электромагнитных колебаний; б - скорости кумулятивной струи; в - массы заряда взрывчатого вещества; г - температуры продуктов взрыва.

Для гранита (рисунок 1а) участок 200 ... 300 ГГц отмечается экспоненциальным падением энергоемкости с 60 до 40 кВт·ч/м³ с тангенсом угла падения $\text{tg}(30^\circ) = 0.5$. Это объясняется преобладанием упругих свойств массива ГП вследствие отсутствия технологической трещиноватости. На участке 300 ... 400 ГГц происходит сглаживание зависимости с последующим пологим падением функции с тангенсом угла $\text{tg}(75^\circ) = 3.73$. ГП уже ослаблены технологической трещиноватостью, что вызывает затухание колебаний вследствие отсутствия резонанса.

Ниспадающая логарифмически - экспоненциальная зависимость энергоемкости разрушения ГП от скорости приложения нагрузки (рисунок 1б) имеет три характерных участка: первый - пологий отрезок в диапазоне от 2 до 4 км/с с тангенсом угла падения $\text{tg}(70^\circ) = 2,7$, что объясняется увеличением сопротивления породы деформациям с ростом скорости приложения нагрузки, и связано с начальным уплотнением ГП; 2 - ниспадающий отрезок в диапазоне 4 ... 8 км/с с тангенсом угла падения $\text{tg}(45^\circ) = 1$ - энергия взрыва имеет волнообразную форму и каждый пик нагрузки чередуется его спадом, при котором ГП разупрочняются, то есть уменьшается сопротивление деформациям и начинается процесс разрушения, третья - пологий отрезок за отметкой 10 км/с с тангенсом угла падения $\text{tg}(70^\circ) = 2,7$ - уже сформирована технологическая трещиноватость и возрастание скорости приложения нагрузки приводит к измельчению ГП, при этом уменьшение размера фракций приводит к росту энергоемкости по экспоненциальной зависимости.

На рисунке 1в видно, что энергоемкость разрушения также падает по экспоненте с ростом массы заряда. График делится на три участка: первый - от 0 до 0,4 кг с тангенсом угла падения $\text{tg}(35^\circ) = 0,70$ характеризуется резким снижением

энергоемкости разрушения, что объясняется увеличением потенциальной энергии взрыва, а следовательно и разрушительного эффекта; вторая - от 0,4 до 0,8 кг с тангенсом угла падения $\operatorname{tg}(50^\circ) = 1,19$ также отмечается снижением энергоемкости, но с меньшей интенсивностью. Это связано с тем, что увеличение массы заряда происходит за счет увеличения длины заряда по вертикали, в результате чего возникает рассеивание энергии взрыва по скважине, третья - пологий участок от 0,8 до 1 с тангенсом угла падения $\operatorname{tg}(60^\circ) = 1,73$. При этом плотность заряда остается неизменной и увеличение массы заряда происходит за счет его размера, что приводит к большему рассеиванию кинетической энергии продуктов взрыва. Кроме этого в условиях крепких пород частота колебаний ударных импульсов возрастает, а продолжительность их действия уменьшается. Поэтому глубина проникновения 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.

Прямолинейная регрессивная зависимость энергоемкости разрушения от температуры продуктов взрыва (рисунок 1г) отражает снижение упругих и прочностных характеристик ГП с увеличением температуры. При импульсном повышении температуры до 900 ... 1173 К вследствие детонации, ГП не успевает расшириться, в результате чего возникают волны сжатия и разрежения. Наличие волнообразных напряжений внутри твердого тела приводит к деформации и разрушения. При этом снижение энергоемкости разрушения ГП незначительно и уменьшается с $6,228 \cdot 10^4$ до $6,225 \cdot 10^4$ Вт·ч/м³ для гранита. Это объясняется снижением скорости распространения продольных и поперечных волн с увеличением температуры ГП. Предложенная модель свидетельствует о том, что температура взрыва не является самостоятельным движущим фактором, а лишь вспомогательным.

Сравнив результаты моделирования с известными эмпирическими зависимостями [30, 31] установлено, что предложенная модель адекватно описывает геомеханические процессы, протекающие во время комбинированного разрушения горных пород взрывом - механическими нагрузками. В экспериментальных работах [19, с. 351] частота электромагнитных излучений при взрыве достигает 300 ГГц. Согласно [30, с. 3] доказано, что применение ультразвуковых колебаний облегчают механическое разрушение ГП. Так, без наличия ультразвукового воздействия на породу разрушающая нагрузка составляет 43 кН и достигается на 7-й секунде нагрузки. При наличии ультразвукового воздействия разрушающая нагрузка уменьшается до 23 кН и достигается на 5-й секунде нагрузки. Итак, применение ультразвуковых колебаний способствует уменьшению механического усилия на разрушение на 37... 45 % [30, с. 4].

Согласно с проведенным аналитическим исследованиям получены следующие результаты: вследствие воздействия электромагнитных колебаний энергоемкость разрушения гранита снизилась с 60 до 30 кВт·ч/м³, то есть на 50 %, увеличение скорости приложения нагрузки снизило энергоемкость разрушения с 78 до 15 кВт·ч/м³, или на 80%; эффективное увеличение массы заряда снизило энергоемкость разрушения гранита с 80 до 15 кВт·ч/м³, или на 80 %, повышение температуры снижает затраты энергии на разрушение гранита с 62,28 до 62,25 кВт·ч/м³, или на 0,0005 %. Среднее суммарное снижение энергоемкости достигает 52%.

Заключение

1. Разработана математическая модель комбинированного разрушения горных пород взрывом - механическими нагрузками, которая отличается от известных тем, что учитывает комбинированное воздействие взрывных и механических нагрузок.
2. Установлены и проверены следующие зависимости:

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

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

- ниспадающая логарифмически - экспоненциальная зависимость энергоемкости разрушения ГП от скорости приложения нагрузки. Увеличение скорости приложения нагрузки уменьшило энергоемкость разрушения с 78 до 15 кВт·ч/м³, или на 80 %;

- прямолинейная регрессивная зависимость энергоемкости разрушения от воздействия температуры продуктов взрыва. Импульсное повышение температуры снижает затраты энергии на разрушение ГП с 62,28 до 62,25 кВт·ч/м³, или на 0,0005 %.

Литература

1. Barbee T. W. Dynamic fracture criteria for ductile and brittle metals / T. W. Barbee, Jr Seaman, R. L. Crewdson, D. R. Curran // Journal of materials, JMLSA. – 1972. – 7 – P. 393 – 401.
2. Будников В.Ф. Проблемы механики бурения и заканчивания скважин [Текст] / В. Ф. Будников, А. И. Булатов, П. П. Макаренко – Недра, 1996. – 495 с. ISBN: 5-247-03642-5.
3. Griffith A. A. The phenomena of rupture and flow in solids [Text] / A. A. Griffith. – Philosophical transactions of the Royal Society of London, Series A, 221, 1920 – P. 163-198.
4. Басарыгин Ю. М. Теория и практика предупреждения осложнений и ремонта скважин при их строительстве и эксплуатации: Справ. Пособие [Текст] / Ю. М. Басарыгин, В. Ф. Будников, А. И. Булатов. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2001, Т.3.
5. Николаева Е. А. Основы механики разрушения [Текст] / Е. А. Николаева. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т., 2010. – 103 с.
6. Бартенев Г. М. О временной и температурной зависимости прочности твердых тел [Текст] / Г. М. Бартенев. - Изв. АН СССР. Отд. техн. наук., 1955. — т.9, С. 53 - 64.
7. Екобори Т. Физика и механика разрушения и прочность твердых тел. [Текст] / Т. Екобори. - М.: Мир, 1971 - 264 с.
8. Журков С. Н., Временная зависимость прочности твердых тел // Журнал технической физики [Текст] / С. Н. Журков, Б. Н. Нарзулаев - 1953, т. 23, вып. 10. С. 1677-1681.
9. Irwin G. R. Fracture dynamics [Text] / G. R. Irwin. – Cleveland: Fracturing of metals (ASM) Symp., 1948 – P. 147 – 166.
10. Kanel G. I. Simulation of spall fracture of aluminium and magnesium over a wide range of load duration and temperature / G. I. Kanel, S. V. Razorenov, Bogatch et al. // Hyper velocity impact symposium. – Freiburg. – 1996.
11. Klepaczko J. R. Dynamic crack initiation, some experimental methods and modeling / J. R. Klepaczko // Klepaczko J. R. (Ed.), Crack dynamics in metallic materials. – Springer-Verlag, Vienna, 1990. – P. 255.
12. Orowan E. Fracture and strength of solids [Text] / E. Orowan. - Rep. Prog. Phys., 1949. – P. 185-232.
13. Гадиев С.М. Использование вибрации в добыче нефти [Текст] / С. М. Гадиев. - М., «Недра», 1977. - 159 с.
14. Ребиндер П. А. Понижители твердости в бурении: Физико-химический метод облегчения механического разрушения твердых горных пород при бурении [Текст] /

- П. А. Ребиндер, Л. А. Шрейнер, К. Ф. Жигач. – М.: Издательство АН СССР, 1944. – 200 с.
15. Кирпичев В. Л. О подобии при упругих явлениях [Текст] / В. Л. Кирпичев. - Журнал Русского физико-химического общества, 1874. - Т. 6, вып. 9. – С. 90-120.
 16. Rittinger Peter Ritter von. Lehrbuch der Aufbereitungskunde in ihrer neuesten Entwicklung und Ausbindung systematisch dargestellt [Text] / Peter Ritter von Rittinger. – Berlin: Ernst & Kern, 1867. – 595 с.
 17. Hanim S. Effects of initial temperature on spoiling of metals [Text] / S. Hanim, J. R. Klepaczko / Journal de Physique. – 2000. 10. – P. 397.
 18. Тангаев И. А. Энергоемкость процессов добычи и переработки полезных ископаемых [Текст] / И. А. Тангаев. – М.: Недра, 1986. - 231 с.
 19. 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.
 20. Зуев В. В. Кристаллоэнергетика как основа оценки свойств твердотельных материалов [Текст] / В. В. Зуев, Л. Н. Поцелуева, Ю. Д. Гончаров / Санкт-Петербург, 2006. - Режим доступа: <http://alfapol.ru/publikacii/book1>
 21. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых. Справочник геофизика / Под ред. Н. Б. Дортман. – 2-е изд. – М: Недра. – 1984. – 455с.
 22. Немиллов С. В. Оптическое материаловедение. Оптические стекла: Учебное пособие. – СПбГУ ИТМО. – 2011. – 175с.
 23. Баум Р. А., Физика взрыва [Текст] / Р. А. Баум, К. П. Станюкевич. - М.: Наука, 1959. - 800 с.
 24. Акимова Т. Н. Природные каменные материалы: методическое пособие [Текст] / Т. Н. Акимова, И. Б. Курденкова. – М: МАДИ (ГТУ), 2007. – 54 с.
 25. Кикоин И. К., Таблицы физических величин. Справочник [Текст] / И. К. Кикоин. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008с.
 26. Бугаенко Л. Т., Средняя электронная плотность атомных валентных электронов и физико-химические свойства элементов. II. Свойства металлов в жидком состоянии [Текст] / Л. Т. Бугаенко, С. М. Рябых. - Вестник Московского университета. Сер. 2, Химия. 1999, Т. 40, № 4. С. 277 – 283.
 27. Котяхов Ф. И. Физика нефтяных и газовых коллекторов [Текст] / Ф. И. Котяхов. – М.: Недра, 1977. – 287с.
 28. Потемкина С. Н. Конспект лекций по физике [Текст] / С. Н. Потемкина. – Тольятинский государственный университет, 2005. – 100с.
 29. Вибухові роботи. Фізичні параметри вибуху, елементи технологій, охорона праці: Метод. вказівки до практ. занять. [Текст] / Уклад.: В. Г. Кравець, В. С. Прокопенко та ін. – К.: ВПІ ВПК «Політехніка», 2005. – 72 с.
 30. Бондарец А. И. Ультразвуковая интенсификация разрушения горных пород [Текст] / А. И. Бондарец, А. Г. Дербас, Л. И. Лаухина, С. П. Самошкина, О.В.Чернявская // Наук. пр. Донец. нац. техн. ун-ту. Сер. гірн.-електромех. - 2010. - Вип. 18. - С. 131-137.
 31. Байдюк Б. В. Механические свойства горных пород при высоких давлениях и температурах [Текст] / Б. В. Байдюк. - М.: Гостоптехиздат, 1963. -75 с.