

**ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ
НА ЭНЕРГОЕМКОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА
ДИНАМИЧЕСКИМИ НАГРУЗКАМИ**

Д. В. Савельев

ГВУЗ «Национальный горный университет»

просп. К. Маркса, 19, г. Днепропетровск, 49005, Украина.

И. Л. Кратковский, К. С. Ищенко

Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины

ул. Симферопольская, 2а, г. Днепропетровск, 49005, Украина.

E-mail: kratkovsky@i.ua; ishenko_k@i.ua

Рассмотрены результаты экспериментальных исследований влияния поверхностно-активных веществ (омагниченная вода, известковое молоко, 10 % растворы пищевой и кальцинированной соды) на энергоемкость разрушения углепородного массива динамическими нагрузками различной интенсивности (ударными, взрывными). Установлено, что при целенаправленном изменении прочностных свойств песчаников, известняков и углей путем насыщения их поверхностно-активными веществами наблюдается устойчивый тренд в сторону уменьшения удельной энергии разрушения. Особенно заметно влияние поверхностно-активных веществ, в частности, растворов, обладающих щелочной реакцией, при разрушении взрывными нагрузками кварцсодержащих песчаников и известняков. В данном случае удельная энергия разрушения уменьшается вдвое для песчаников и вчетверо для известняков по сравнению с образцами, не обработанными поверхностно-активными веществами. Обработка углей поверхностно-активными веществами, обладающей щелочной реакцией, не приводит к существенному изменению энергоемкости их разрушения ударом и взрывом.

Ключевые слова: углепородный массив, удар, взрыв, поверхностно-активные вещества, энергоемкость разрушения.

**ВПЛИВ ПОВЕРХНЕВО - АКТИВНИХ РЕЧОВИН НА ЕНЕРГОЄМНІСТЬ
РУЙНУВАННЯ ВУГЛЕПОРОДНОГО МАСИВУ ДИНАМІЧНИМИ
НАВАНТАЖЕННЯМИ**

Д. В. Савельєв

ДВНЗ «Національний гірничий університет»

просп. К. Маркса, 19, м. Дніпропетровськ, 49005, Україна.

И. Л. Кратковський, К. С. Іщенко

Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України

вул. Симферопольська, 2а, м. Дніпропетровськ, 49005, Україна.

E-mail: nanu@igtm.dp.ua; ishenko_k@i.ua

Розглянуті результати експериментальних досліджень впливу поверхнево-активних речовин (омагничена вода, вапнякове молоко, 10 % розчини харчової і кальцинованої соди) на енергоємність руйнування углепородного масиву динамічними навантаженнями різної інтенсивності (ударними, вибуховими). Встано-

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

влено, що при цілеспрямованій зміні міцностних властивостей пісковиків, вапняків і вугілля шляхом насичення їх поверхнево-активними речовинами спостерігається стійкий тренд у бік зменшення питомої енергії руйнування. Особливо чутний вплив поверхнево-активних речовин, зокрема, розчинів, що мають лужну реакцію, під час руйнування вибуховими навантаженнями пісковиків, що містять кварц, і вапняків. В даному випадку питома енергія руйнування зменшується вдвічі для пісковиків і учетверо для вапняків у порівнянні зі зразками, не обробленими поверхнево-активними речовинами. Обробка вугілля поверхнево-активними речовинами, що мають лужну реакцію, не веде до суттєвої зміни енергоємності їх руйнування ударом і вибухом.

Ключові слова: вуглепородний масив, поверхнево-активні речовини, вибухове руйнування, гранулометрія, дисперсність

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Разрушение горных пород и других твердых сред механическими или динамическими нагрузками, т.е. дробление и измельчение материалов, находит широкое применение в различных отраслях промышленности и составляет основу многих технологических процессов. В частности, при бурении скважин, дроблении горных пород на стадии их отделения от горного массива и последующей переработки с образованием частиц с большим спектром крупности.

Одним из основных показателей оценки качества взрыва является степень дробления горных пород, зависящая от многих факторов. Определяющими факторами в процессе разрушения является энергия, передаваемая твердой среде, а также ее энергетические характеристики. Дробление твердых тел и горных пород, зависит от таких энергетических характеристик, как энергоёмкость разрушения при механической и динамической нагрузке, коэффициент полезного использования энергии взрыва и коэффициент дробимости.

Цель данной работы – экспериментальные исследования в лабораторных условиях энергоёмкости разрушения пород, слагающих углепородный массив.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Для изучения и оценки энергоёмкости разрушения анизотропных горных пород при динамических нагрузках с учетом направленного изменения их свойств был разработан способ оценки таких изменений в лабораторных условиях. Приоритет способа защищен патентом Украины [1].

Способ включает в себя бурение скважин, отбор образцов горных пород (кернов), определение физико-механических характеристик и деформаций пород. В соответствии с предлагаемым способом, сначала на блоке горных пород, подготовленному к разработке, или в местах проходки горных выработок бурят геологоразведочные скважины, осуществляют отбор ориентированных кернов или штаффов горных пород. Затем в лабораторных условиях на камнерезной машине алмазным диском формируют эталонные срезы для изготовления шлифов и плоскости для изготовления моделей горного массива для разрушения на копре ударом свободно падающего груза, а других – взрывом заряда взрывчатого вещества (ВВ).

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

После этого в части моделей горного массива, предварительно установив их в кондуктор для центрирования, в торце керна в центре бурят взрывные полости на глубину 2/3 толщины моделей. После насыщения моделей поверхностно активными веществами (ПАВ) и размещения во взрывной полости зарядов высокобризантного ВВ их устанавливают в специальный бокс – взрывную камеру. В пространство между внутренней стенкой камеры и поверхностью моделей размещают демпфирующую прокладку (обычно вакуумную резину) и взрывают. Далее разрушенные модели (образцы горных пород) вынимают из камеры и путем рассеивания на лабораторных ситах отделяют от разрушенной части моделей мелкие фракции (0–100 мкм). Затем с помощью метода оптической микроскопии оценивают характер разрушения породы по гранулометрическим характеристикам, а энергоемкость разрушения определяют по величине работы, затраченной на образование новой поверхности частиц продуктов разрушения породы.

Для исследований физико-механических характеристик и энергоемкости разрушения пород углепородного массива были отобраны образцы в форме куба с размером ребра 350 мм и керны диаметром 55–57 мм. Описание образцов приведено в табл. 1.

Таблица 1 – Сведения об образцах пород, отобранных для исследований физико-механических свойств и энергоемкости разрушения

№ п/п	Тип породы	Место отбора проб	Характеристика породы
1	Песчаник средне- и мелкозернистый	ш. Днепровская «ДТЭК-Павлоградуголь», 110У сб. штрек, кровля пласта С ₁₀	Песчаник светло-серый, среднезернистый, крепкий
2		ш. Сташкова «ДТЭК-Павлоградуголь», 519 сб штрек, кровля пласта С ₅	Песчаник серый мелкозернистый, горизонтально-слоистый, крепкий
3		ш. Благодатная «ДТЭК-Павлоградуголь», 2-й зап. маг. отк. штр, кровля пласта С ₅ , гор. 250м	Песчаник светло-серый, крупнозернистый, прерывисто-слоистый, крепкий
4	Песчаник крупнозернистый	ш. Скочинского «ПрАО Донуголь», гор. 1200 м, скв. 11495	Песчаник серый, крупнозернистый, горизонтально-слоистый, крепкий
5	Известняк	ПрАТДФДК, Центральный карьер, гор. -80м	Известняк переотложенный, мелкозернистый, темно- и светло-серый сливной незначительно доломитизированный
6	Уголь	ш. Терновская «ДТЭК-Павлоградуголь», 576 борт. штрек, пласт С ₅ , гор. 245м	Уголь горизонтально-слоистый (слои витрена, фюзена, кларена и дюрена)
7		ш. Свердлова ПрАО «ДТЭК-Свердловантрацит», пл. к ₅ ¹ конвейерный штрек, гор. 1115м	Уголь горизонтально-слоистый (слои витрена, фюзена, кларена и дюрена)

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

Для детального аналізу і отримання прочностних характеристик вмещаючих порід і углей углепородного масива, таких як щільність, межа міцності на одностороннє стиснення, швидкість продольних і поперечних хвиль, коефіцієнт Пуассона і модуль Юнга, із отобраних проб і ядер (табл. 1) виготовляли моделі для проведення їх випробувань згідно діючим ГОСТам [2, 3]. Виготовлення моделей для лабораторних випробувань проводили на камерній машині з відокремленим алмазним диском діаметром 250 мм. Для кожної серії випробувань було підготовлено 10 моделей кубічної форми з розміром ребра 40 ± 3 мм. Грані зразків оброблялись шліфувальним порошком, при цьому їх кривизна не перевищала 0,05 мм. Контроль торцевих поверхностей (граней) зразків здійснювали індикатором по двом взаємно перпендикулярним граням. Відхилення граней від паралельності складало $\pm 0,1$ мм.

Підготовлені таким чином зразки піддавалися випробуванням на одностороннє стиснення на гідравлическому пресі ПР-500 апробованим методом визначення межі міцності на одностороннє стиснення [4]. Контроль тиску здійснювався манометром, а вимір поперечної деформації – тензодатчиками переміщення. Отримана інформація в автоматичному режимі надходила на комп'ютерний комплекс для відповідної обробки і побудови діаграми «напруження-деформація».

Результати випробувань заносилися також в табличній формі в комп'ютерну базу даних. Межа міцності зразка по формулі:

$$\sigma_{\text{сж}} = \frac{P_{\text{max}}}{F_0}, \text{ МПа}$$

де $F_0 \cdot \frac{\pi d^2}{4} \approx 0,785d^2$ – початкова площа поперечного перерізу зразка, см^2 ;

d – діаметр зразка, см .

Дослідження акустичних властивостей гірських порід – швидкості поширення продольних і поперечних хвиль – проводилося на стенді, розробленому в ІГТМ НАН України. В склад стенда входить переносний імпульсний ультразвуковий прилад УК-10ПМ з п'єзоперетворювачами поршневого типу в захисній шкірці з аксіально-поляризованої кераміки ЦТС або прилад серії УК-10ПМС з осцилографічною індикацією і автоматизованою обробкою отриманих осцилограм швидкостей продольних і поперечних хвиль з виводом результатів на монітор, монтажний модуль для установки зразка породи з датчиками. Технічні характеристики стенда: частота повторення зондувальних імпульсів не менше 25 Гц, амплітуда вихідних імпульсів 100-160 В, час проходження пружного імпульсу не менше $0,5 \cdot 10^{-6}$ с. При використанні приладу УК-10ПМ обробка результатів випробувань проводилася апробованим методом визначення швидкості поширення продольних і поперечних хвиль [5]. Хороший контакт з п'єзоперетворювачами забезпечувався мастиком поверхні зразків технічним вазеліном високої ступені очищення.

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

Подготовленные образцы пород устанавливали между пьезопреобразователями и при устойчивой картинке колебаний на экране прибора производили замер скорости распространения упругих волн, как в ручном, так и в автоматическом режиме с индикацией на экране осциллографа. Замеры скорости распространения упругих волн осуществляли по 3-м парам граней образца, затем определяли их среднее значение. Полученные средние расчетные величины скоростей распространения упругих волн с точностью не более 10 % и степенью надежности 0,95 достигались испытанием не менее 10-ти образцов по каждому типу породы.

Модуль Юнга по измеренным значениям скоростей распространения упругих волн в образце горной породы определяли по формуле:

$$E = \rho V_p^2, \quad (1)$$

где ρ – плотность смеси;

V_p – скорость продольной волны.

Для ускорения и упрощения процесса определения упругих параметров образцов пород использовались номограммы В. Рентча и Г. Кромфолза, позволяющие оперативно определять коэффициент Пуассона по отношениям V_p/V_s [6]. Значение акустических и физико-механических характеристик испытываемых горных пород приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Экспериментальные и расчетные значения акустических и физико-механических характеристик испытываемых пород

№ серии испытаний	Тип горной породы	Коэф. крепости, f	Плотность образцов, $\rho \cdot 10^3$, кг/м ³	Скорость продольной волны, V_p , м/с	Скорость поперечной волны, V_s , м/с	V_s/V_p	Коэффициент Пуассона, ν	Модуль Юнга, E , МПа
*1	Песчаник, ш. Днепровская	12-15	2,95	6400	3800	0,59	0,23	18,9
*2	Песчаник, ш. Сташкова	10-13	2,3	5300	3500	0,66	0,11	12,1
*3	Песчаник, ш. Благодатная	4-5	2,10	4800	3300	0,68	0,07	10,0
*4	Песчаник, ш. Скочинского	8-10	2,8	6300	3600	0,57	0,25	17,6
*5	Известняк ПрАОДФДК	10-12	3,0	5500	2750	0,50	0,22	7,0
*6	Уголь, пл. C_5^B ш. Терновская	3-4	1,24	1450	725	0,50	0,25	4,2
*7	Уголь – антрацит, пл. k_5^1 , ш. Свердловва	1-2	1,8-2,0	1145	573	0,50	0,14	3,6

* – Приводятся средние значения по каждой серии испытаний.

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

Следовательно, энергоемкость разрушения можно представить в виде величины работы, затраченной на образование единицы новой вновь образованной поверхности, определяемой по формуле:

$$q_y = \frac{A_p}{S_n}, \quad (2)$$

где q_y – удельная энергоемкость разрушения, Дж/см²;

A_p – работа, затраченная на дробление, Дж;

S_n – вновь образованная поверхность, см².

Эта величина является характеристикой среды, оцениваемая при одинаковых параметрах нагружения и размеров испытываемых образцов. Однако удельная энергоемкость разрушения не всегда показательна при взрывных нагрузках вследствие особенностей действия взрыва в среде. При взрыве порода, непосредственно примыкающая к заряду ВВ, на короткий промежуток времени сильно сжимается. В этой зоне в результате больших пластических деформаций поглощается значительное количество энергии, что снижает возможность трансформации энергии в дальние зоны. Это в конечном итоге приводит к снижению интенсивности дробления. Величина зоны смятия зависит не только от прочностных свойств материала, но и от упругих свойств.

Поэтому, наряду с удельной энергоемкостью разрушения горных пород необходимо учитывать коэффициент полезного использования энергии взрыва, т.е. отношение энергии, идущей на дробление, к общей энергии ВВ.

Следовательно, коэффициент полезного использования энергии взрыва ВВ зависит от ряда факторов: физико-механических свойств (упругих постоянных, разрушающего напряжения, количества зон пониженной прочности, скорости развития трещин), типа ВВ и др., что затрудняет его теоретическое определение. Экспериментально он может быть рассчитан как отношение удельной энергоемкости разрушения данной породы к величине энергоемкости разрушения при взрыве для конкретных условий и параметров взрывных работ. Данная величина представляет собой количество энергии ВВ, затрачиваемой на единицу площади вновь образованной поверхности:

$$q_g = \frac{E_{ВВ}}{S'_n}, \quad (3)$$

где q_g – энергоемкость разрушения при взрыве, Дж/см²; $E_{ВВ} = Q\gamma$,

Q – теплота взрыва, кДж/кг; γ – масса заряда ВВ, кг;

S'_n – вновь образованная поверхность при взрыве, см².

Тогда коэффициент полезного использования энергии взрыва определяется из выражения

$$\eta_g = \frac{q_y}{q_g}. \quad (4)$$

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

Величину удельной энергоемкости разрушения оценивали по известным методикам [7].

Для проведения экспериментальных исследований в лабораторных и полигонных условиях на моделях была разработана методика, позволяющая оценить характер и энергоемкость разрушения твердых сред при свободно падающем грузе и взрыве. При этом использовались как сухие образцы, так и с измененными прочностными свойствами под воздействием различных растворов – поверхностно-активных веществ.

В соответствии с разработанной методикой предусматривалось несколько серий экспериментальных исследований:

- энергоемкость разрушения образцов горных пород при свободно падающем грузе;
- энергоемкость разрушения образцов горных пород при взрыве.

В соответствии с методикой исследований отобранные вне зоны воздействия динамических (взрывных) нагрузок образцы горных пород (геологоразведочные керны диаметром 43-75 мм) в лабораторных условиях на камнерезной машине распиливали на модели кубической формы с размером ребра 40 ± 2 мм и модели цилиндрической формы высотой равной диаметру керна. Для определения энергоемкости разрушения при взрыве в подготовленных моделях в центре одной из граней алмазным сверлом сверлили взрывную полость на $2/3$ ее высоты диаметром 4-5 мм.

В работе [8] приводятся данные о том, что прочность разрушаемых горных пород может быть существенно снижена путем их обработки ПАВ. В этой связи, отобранные для исследований образцы горных пород (модели) насыщались нами поверхностно-активными веществами (ПАВ). Поскольку подавляющее большинство горных пород различного генезиса в своем составе содержит кварц (в том или ином количестве), часто выполняющего роль своеобразного «цемента», прочность которого резко снижается при воздействии растворов кальцинированной (Na_2CO_3), либо пищевой соды (NaHCO_3) [9, 10], именно эти вещества были выбраны в качестве ПАВ.

Экспериментальные образцы выдерживали в 10 %-х растворах Na_2CO_3 и NaHCO_3 , а также омагниченной воде и известковом молоке. Контрольные и экспериментальные образцы с исходной влажностью взвешивали, затем высушивали в сушильном шкафу в течение суток и опять взвешивали. По полученным данным определяли их природную влажность, которая не должна превышать 8-12 %. Далее образцы насыщали растворами ПАВ в течение 24 час и перед экспериментами опять взвешивали и определяли их влажность после насыщения по формуле:

$$W = \frac{g_1 - g_2}{g_2} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где g_1 и g_2 – масса образца горной породы соответственно до и после сушки, г.

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

Подготовленные образцы (контрольные и экспериментальные) разрушали на вертикальном ударном копре свободно падающим с высоты 1 м грузом массой 21,4 кг. Затраченная на разрушение образца работа при этом составляла 210 Дж. Кроме того, в полигонных условиях образцы разрушали динамической нагрузкой высокой интенсивности (взрывное разрушение моделей) в специальной взрывной камере (рис. 1 и 2).

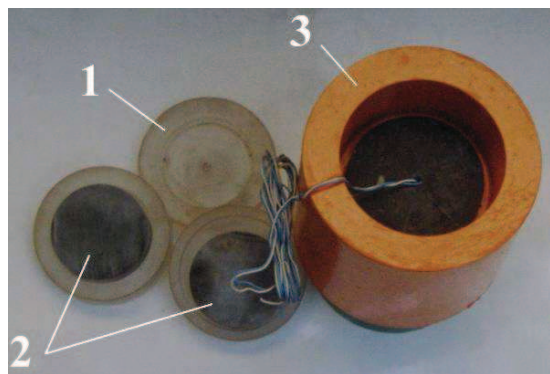


Рисунок 1 – Общий вид кондуктора, образца горной породы и взрывной камеры: 1 – кондуктор; 2 – образец горной породы; 3 – взрывная камера

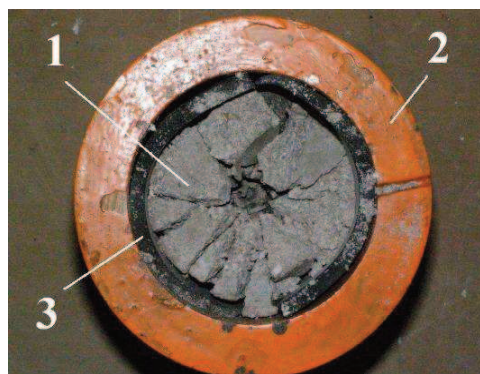


Рисунок 2 – Образец горной породы во взрывной камере после разрушения: 1 – образец; 2 – взрывная камера; 3 – демпфирующая прокладка

Энергоемкость разрушения горных пород взрывом оценивалось по результатам дробления образцов высокобризантным ВВ, например, тэном, помещенным во взрывную полость вместе с инициатором. Образец породы размещали во взрывной камере, внутренняя поверхность которой футерована резиновой прокладкой для уменьшения вторичного дробления, и дистанционно подрывали конденсаторным взрывным прибором, электронная схема и внешний вид которого представлен на рис. 3, а, б. Электронный взрывной прибор конденсаторный (ВПК, ВПК-1) разработан в ИГТМ НАН Украины совместно с ГВУЗ «Национальный горный университет», приоритет которого защищен патентами Украины [11, 12].

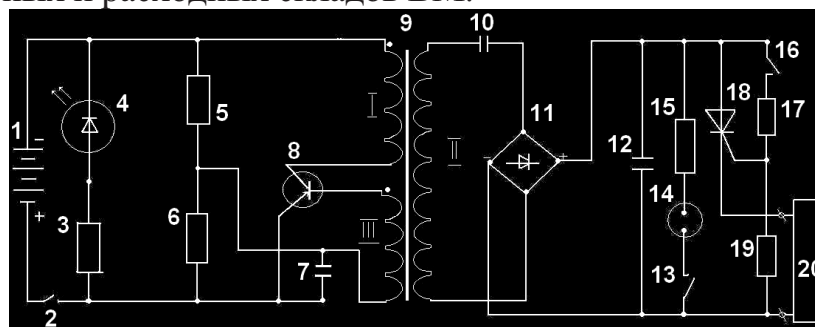
Масса заряда ВВ во всех сериях экспериментов составляла 0,150 г, удельный расход ВВ – 0,042 кг/м³. В качестве забойки использовался кварцевый песок фракции 0,25 мм.

Взрывной прибор имеет электронную схему (рис. 3, а), в которую включен преобразователь напряжения на базе однотактного импульсного генератора с транзистором в цепи делителя напряжения и конденсатора, соединенного с первичными обмотками трансформатора с выходом на вторичную обмотку, промежуточным конденсатором, диодным блоком и конденсатором-накопителем с системой сигнализации зарядки конденсатора-накопителя, входящего в цепь защитного блока пускового ключа управляемого электрода коммутирующего тиристора, соединенной с взрывной цепью. Он снабжен системой предохранительной блокировки и приспособлен к работе в различных климатических условиях. Основные элементы прибора размещены в защитном корпусе. Разработанная схема и элементы управления, включенные в модель прибора, обеспечивают повышение КПД его, надеж-

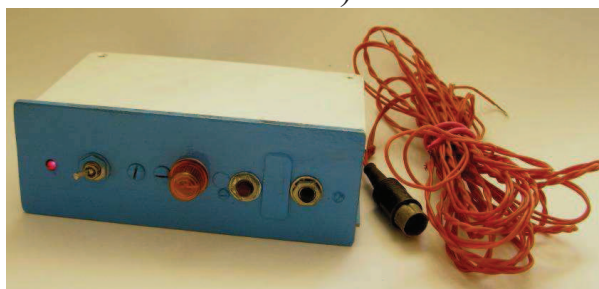
Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. Випуск 1/2015(15).

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

ность управления электровзрыванием, безопасность ведения взрывных работ, как в промышленных условиях шахт и рудников, так, и при испытании ВВ в полигонных условиях базисных и расходных складов ВМ.



а)



б)

Рисунок 3 – Электрическая схема а) и внешний вид б) конденсаторного взрывного прибора ВПК

Основные технические характеристики моделей взрывных приборов приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Техническая характеристика электронного конденсаторного взрывного прибора ВПК

Основные параметры прибора	Ед. изм.	Тип прибора	
		ВПК-1	ВПК
Длительность воспламенительного импульса	с	5 10 ³	
Напряжение воспламенительного импульса	В	400	600
Емкость накопительных конденсаторов	мкф	20	40
Количество одновременно взрывааемых электродетонаторов с нихромовым мостиком накаливания	шт.	70	100
Количество одновременно взрывааемых электродетонаторов с константановым мостиком накаливания		35	70
Время подготовки прибора к работе	с	5-10	
Источник питания, 4,5 В – 3 батареи R-14			
Срок службы батареи источника питания	мес.	6	
Габаритные размеры	мм	220×110	

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

Продолжение табл. 3			
Масса прибора	кг	1,1	1,2
Конструкция корпуса	–	защитная безопас- ная	защитная безопас- ная
Срок службы прибора	цикл	не менее 4000	не менее 6000

После каждой серии экспериментов проводилось исследование гранулометрического состава разрушенных моделей методом ситового анализа по методике, изложенной в работе [13], с применением набора лабораторных сит с отверстиями размером 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 5,0; 7,0; 10,0 мм. Сита устанавливали сверху вниз от крупных размеров к мелким. Разрушенный материал модели помещали на верхнее сито, и весь набор встряхивали в течение 10 минут. Остаток на каждом сите взвешивали на технических весах с точностью до 0,1 %. Сумма всех полученных классов крупности не должна более чем на 1 % расходиться с массой исходной модели. Сумма всех классов крупности принималась за 100 %. Выход классов получали делением массы каждого класса на исходную массу модели.

При обработке гранулометрического состава разрушенной модели дробленый материал анализировался по следующим основным показателям: характер разрушения модели в целом, определение общей массы модели разрушенной взрывом и свободно падающим грузом, содержание мелких фракций, содержание крупных фракций, диаметр среднего куска и новой вновь образованной поверхности. Диаметр среднего куска определяли из выражения

$$d_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^i w_i d_i}{100}, \quad (6)$$

где w_i – содержание i -й фракции или i -го куска, %;

d_i – средний размер i -го куска или i -й фракции, см, а суммарную вновь образованную поверхность по формуле,

$$S_n = \frac{6}{\rho} \left[\frac{m_1}{d_{1cp}} + \frac{m_2}{d_{2cp}} + \frac{m_3}{d_{3cp}} + \frac{m_4}{d_{4cp}} + \dots + \frac{m_n}{d_{nmd}} \right] - S_0, \quad (7)$$

где S_n – площадь вновь образованной поверхности, см²;

d_{nmd} – средний размер i -й фракции, см;

m_i – масса i -й фракции, г;

S_0 – первоначальная поверхность образца модели, см².

По рассчитанным значениям вновь образованной поверхности разрушенных образцов определяли удельную энергоемкость разрушения при свободно падающем грузе и энергоемкость разрушения моделей при взрыве по формулам (2) и (3). Зная удельную энергоемкость разрушения q_v и энергоемкость разрушения при взрыве q_b рассчитаем коэффициент полезного использования энергии взры-

Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. Випуск 1/2015(15).

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

ва по формуле (3), а показатель, характеризующий степень раздробленности образца горной породы из соотношения

$$K_{\partial} = \frac{S_o}{S_n}, \quad (8)$$

где K_{∂} – коэффициент раздробленности образца горной породы;

S_o – начальная площадь поверхности образца, см²;

S_n – вновь образованная площадь поверхности после взрыва, см².

Результаты экспериментальных исследований по оценки дробимости и их взаимосвязи с энергоемкостью и другими физико-механическими свойствами приведены в табл. 4 и 5.

Таблица 4 – Общая характеристика образцов горных пород различного генезиса перед проведением экспериментальных исследований с целенаправленным изменением их свойств

№ модели	Тип породы и место отбора образцов	Размер модели, мм	Масса модели, кг	Характеристика модели		Влажность образцов, W % после насыщения*
1.	Песчаник, ш. Днепровская «ДТЭК Павлорградуголь»	41×41×42	0,20	Не насыщенная ПАВ		Равна естественной влажности
		44×44×44	0,23	Насыщенная ПАВ	Na ₂ CO ₃	
		43×43×43	0,22		NaHCO ₃	
		44×44×44	0,23		Известковое молоко	
2.	Песчаник, ш. Сташкова, «ДТЭК Павлоградуголь»	41×41×41	0,17	Не насыщенная ПАВ		Равна естественной влажности
		41×41×42	0,18	Насыщенная ПАВ	Омагниченная вода	
		41×41×42			Na ₂ CO ₃	
		41×41×42			NaHCO ₃	
		41×41×41			Известковое молоко	
3.	Песчаник, ш. А.А. Скочинского, «ПраО Донуголь»	57×57	0,350	Не насыщенная ПАВ		Равна естественной влажности
		55×55	0,33	Насыщенная ПАВ	Омагниченная вода	18-20
		55×55	0,32		Na ₂ CO ₃	
		55×55	0,31		NaHCO ₃	
		55×55			Известковое молоко	
4.	Известняк ПраОДФДК	43×43×44	0,22	Не насыщенная ПАВ		Равна естественной влажности
		43×44×43	0,23	Насыщенная ПАВ	Na ₂ CO ₃	
		43×44×43	0,21		NaHCO ₃	
		43×41×43			Известковое молоко	

**ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ
РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ**

Продолжение табл. 4

5.	Уголь, пл. С ₅ ^В ш. Терновская, «ДТЭК-Павлоградуголь»	41×41×42	0,83	Не насыщенная ПАВ		Равна естественной влажности
		40×43×42	0,90	Насыщенная ПАВ	Na ₂ CO ₃	
		41×41×41	0,85		NaHCO ₃	
		41×42×40	0,90		Известковое молоко	
6.	Уголь – антрацит, пл. k ₅ ¹ , ш. Свердлова, ПрАО «ДТЭК Свердловантрацит»,	30×41×41	1,00	Не насыщенная ПАВ		Равна естественной влажности
		34×41×41	0,95	Насыщенная ПАВ	NaHCO ₃	
		35×41×41			Известковое молоко	

* влажность всех образцов до насыщения ПАВ – 10-12 %

Таблица 5 – Гранулометрические и энергетические характеристики разрушенных образцов горных пород различного генезиса динамическими нагрузками с целенаправленным изменением их свойств

Тип породы	Тип ПАВ	$d_{ср.}$ см	S_0 , см ²	S_n , см ²	q_y , Дж/см ²	q_B , Дж/см ²	η_e	K_d	
Песчаник, ш. Сташкова «ДТЭК-Павлоград- уголь»	Свободно падающий груз (ударный копер)								
	Не насыщенная ПАВ	8,22	104,16	107,31	1,95	-	-	0,97	
	Омагниченная вода	8,30	109,00	214,90	0,97			0,50	
	Известковое молоко	8,70	100,90	76,60	2,74			1,30	
	NaHCO ₃	8,18	92,80	175,90	1,19			0,52	
	Na ₂ CO ₃	8,73	100,90	84,40	2,50			1,20	
	Взрыв								
	Не насыщенная ПАВ	5,20	96,00	217,40	-	3,88	0,50	0,44	
	Омагнич. вода	3,93	102,50	395,00		2,13	0,45	0,26	
	Известковое молоко	4,80	100,90	533,30		1,58	1,73	0,20	
	NaHCO ₃	3,92	104,20	464,20		1,82	0,65	0,22	
	Na ₂ CO ₃	4,90	100,90	461,74		1,83	1,36	0,22	
	Песчаник, ш. Днепро- вская «ДТЭК- Павлоград- уголь»	Свободно падающий груз (ударный копер)							
		Не насыщенная ПАВ	9,00	102,50	61,10	3,43	-	-	1,70
Известковое молоко		9,14	105,80	67,50	3,11	1,56			
NaHCO ₃		9,17	105,84	60,00	3,50	1,80			
Na ₂ CO ₃		8,5	104,20	82,20	2,55	1,26			
Взрыв									
Не насыщенная ПАВ		5,20	104,0	212,1	-	4,00	0,85	0,50	
Известковое молоко		5,15	116,2	242,4		3,50	0,88	0,48	
NaHCO ₃		4,90	110,9	229,2		3,70	0,94	0,48	
Na ₂ CO ₃		4,52	116,21	278,6		3,00	0,85	0,42	
Песчаник, ш. А.А. Ско- чинского, «ПрАО Дон- уголь»	Свободно падающий груз (ударный копер)								
	Не насыщенная ПАВ	10,00	153,00	84,80	2,50	-	-	1,80	
	Омагниченная вода	9,15	153,00	171,0	1,22			0,90	
	Известковое молоко	8,73	153,00	286,0	0,73			0,53	
	NaHCO ₃	9,99	142,50	75,50	2,78			1,88	
	Na ₂ CO ₃	9,39	153,00	230,0	0,91			0,66	

**ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ
РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ**

Продолжение табл. 5								
Взрыв								
	Не насыщенная ПАВ	6,90	142,50	541,00	-	1,56	1,60	0,26
	Омагнич. вода	5,94		543,30		1,55	0,78	0,26
	Известковое молоко	4,70		764,10		1,10	0,66	0,19
	NaHCO ₃	4,84		667,20		1,10	2,52	0,21
	Na ₂ CO ₃	5,83		486,40		1,73	0,53	0,30
Известняк ПраО «ДФДК»	Свободно падающий груз (ударный копер)							
	Не насыщенная ПАВ	8,14	105,80	49,00	4,28	-	-	2,15
	Известковое молоко	8,39	110,90	99,80	2,10			1,20
	NaHCO ₃	7,22	107,50	111,40	1,88			0,96
	Na ₂ CO ₃	7,97	107,50	46,70	4,50			2,30
	Взрыв							
	Не насыщенная ПАВ	5,38	109,2	37,0	-	22,80	0,19	2,95
	Известковое молоко	5,75	107,5	73,7		11,46	0,18	1,45
	NaHCO ₃	5,44	112,6	142,0		6,00	0,31	0,80
	Na ₂ CO ₃	4,39	110,9	146,3		5,77	0,78	0,76
Уголь, пл. С ₅ ^В ш. Тернов- ская, «ДТЭК- Павлоград- уголь»	Свободно падающий груз (ударный копер)							
	Не насыщенная ПАВ	5,70	102,5	245,0	0,86	-	-	0,41
	Известковое молоко	5,50	100,9	265,6	0,80			0,38
	NaHCO ₃	6,40	100,9	232,6	0,90			0,43
	Na ₂ CO ₃	4,67	104,6	281,5	0,75			0,37
	Взрыв							
	Не насыщенная ПАВ	2,61	97,60	521,40	-	1,62	0,53	0,19
	Известковое молоко	2,54	99,20	557,80		1,51	0,53	0,17
	NaHCO ₃	1,09	80,60	780,60		1,00	0,90	0,10
	Na ₂ CO ₃	1,60	79,20	584,50		1,44	0,52	0,13
Уголь – ан- трацит, пл. k ₅ ¹ , ш. Свердлова «ДТЭК- Свердлов- антрацит»	Свободно падающий груз (ударный копер)							
	Не насыщенная ПАВ	3,94	91,26	211,32	0,99	-	-	0,43
	Известковое молоко	4,62	91,26	218,32	0,96			0,42
	NaHCO ₃	4,06	92,82	211,45	0,99			0,44
	Взрыв							
	Не насыщенная ПАВ	1,77	97,60	864,20	-	0,97	1,02	0,11
	Известковое молоко	1,44	91,26	816,70		1,03	0,93	
NaHCO ₃	1,40	89,70	801,70	1,05		0,94		

Анализ приведенных данных показывает, что нет четкой корреляции дробимости с упругими характеристиками среды. Это служит косвенным подтверждением, что неупругая фаза предопределяет процесс разрушения. Однако, как следует из результатов исследований, акустическая жесткость не может характеризовать дробимость горных пород.

ВЫВОДЫ. Эксперименты по исследованию влияния поверхностно-активных веществ на энергоемкость разрушения углепородного массива динамическими нагрузками (ударными и взрывными) позволили установить следующее.

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

Анализ гранулометрических и энергетических характеристик образцов пород углепородной толщи, разрушенных свободным ударом и взрывом, показал, что при целенаправленном изменении свойств пород под воздействием ПАВ (омагниченная вода, известковое молоко, пищевая и кальцинированная сода) изменяется характер их разрушения.

В частности, при увеличении щелочности растворов ПАВ (омагниченная вода → известковое молоко → NaHCO_3 → Na_2CO_3) наблюдается устойчивый тренд в сторону уменьшения удельной энергии разрушения взрывными нагрузками кварцсодержащих пород (песчаников). При разрушении этих же пород ударными нагрузками влияние ПАВ практически незаметно.

Особенно заметно влияние ПАВ на характер разрушения известняка, когда при действии взрывных нагрузок удельная энергия разрушения при насыщении данной породы кальцинированной содой уменьшается вчетверо (с 22,80 до 4,50 Дж/см²). Влияние ПАВ на известняк, разрушаемый свободным ударом не так заметно. Вместе с тем, использование для насыщения образцов известняка известкового молока и пищевой соды приводит к уменьшению удельной энергии разрушения в два раза (с 4,28 до 2,10 и 1,88 Дж/см²) по сравнению с образцами не насыщенными ПАВ.

Насыщение углей различной степени углефикации (уголь марки «Г», шахта Терновская, Западный Донбасс и антрацит, шахта Свердлова, Донбасс) практически не влияет на энергоемкость их разрушения при действии ударных и взрывных нагрузок, хотя для насыщенного поверхностно-активными веществами антрацита наблюдается незначительное (порядка 5-6 %) увеличение удельной энергоемкости разрушения взрывными нагрузками.

Установлено, также, что воздействие ПАВ на породы, слагающий углепородный массив (песчаники, известняки, угли), не приводит к существенному изменению среднего диаметра фрагментов их разрушения ударными и взрывными нагрузками. Однако наблюдается слабый тренд в сторону уменьшения их среднего размера (не более 5-15 %) при возрастании щелочности растворов.

Использование поверхностно-активных веществ позволяет, таким образом, уменьшать удельную энергию разрушения при воздействии на породу динамических нагрузок различной интенсивности (удар, взрыв), что создает основу для разработки новых энергосберегающих способов дробления углепородного массива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 95218 Україна МПК7 G01N 3/00, E21C 39/00 Спосіб оцінки енергоємності руйнування анізотропних гірських порід при різних видах навантаження на моделях / Іщенко К.С., Коновал С.В., Савельєв Д.В., Кратковський І.Л., Круковська В. В.; заявник і власник патенту ІГТМ НАН України. – №u2014 07830, замовл. 11.07.2014, надр. 10.12.2014. – Бюл. № 23.

2. ГОСТ 21153.0–75. Породы горные. Отбор проб и общие методы физических испытаний. Введен с 01.07.75. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 20 с.

3. ГОСТ 10181.2–81. Смеси бетонные. Методы определения плотности. Введен с 01.01.81. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 25 с.

4. ГОСТ 21153.2–84. Породы горные. Метод определения предела прочности при одноосном сжатии. Введен с 01.07.86. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 10 с.

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

5 ГОСТ 21153.7–75. Породы горные. Метод определения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн. Введен с 01.01.75. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 35 с.

6. Временные методические указания по экспресс-определению упругих свойств горных пород ультразвуковым методом на необработанных образцах керна геологоразведочных скважин РД / А.А. Яланский, Т.А. Паламарчук, С.И. Скипочка и др. – Л.: ВНИМИ, 1987. – 41 с.

7. Определение свойств горных пород / Л.И. Барон, Б.М. Логунцов, Е.З. Позин. – М.: Гос.научн.–техн.изд.лит.по горному делу, 1962. – 224 с.

8. Влияние поверхностно-активных веществ на изменение прочностных характеристик горных пород / Я.С. Долударева, Т.Ф. Козловская, В.Д. Лемижанская, А.И. Комир // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. – Кременчук, КрНУ, 2012. - Вип. 1(9). – С. 8–16.

9. Greggs, D. Experiments bearing upon the orientation of quartz in deformation rocks / D. Greggs, J. Bell // Geol.Soc. American Bull. – 1938 – vol. 49. – P. 1723–1746.

10. Fairbairn, H.W. Synthetic quartzite / H.W. Fairbairn // Am. Mineral. – 1950. – Vol.35. – P. 735–748.

11. Пат. № 59776 Україна МПК7 F 42 D 3/04 Вибуховий прилад конденсаторний (ВПК-1) / Іщенко К.С., Іщенко О.К.; заявник і власник патенту ДВНЗ «НГУ» – № u2010 14552; замовл. 06.12.10; надр. 25.05.2011. – Бюл. № 10.

12. Пат. № 98546 Україна МПК7 F 42 D 1/05 Вибуховий прилад конденсаторний / Іщенко К.С., Іщенко О.К.; заявник і власник патенту ДВНЗ «НГУ» № a2010 12302; замовл. 18.10.10; надр. 25.05.2012. – Бюл. № 10.

13. Пат. №85757 Україна МПК7 G01N 3/00, E21C 39/00 Спосіб оцінки структурних змін анізотропних гірських порід при динамічному навантаженні на моделях / Іщенко К.С., Кратковський І.Л., Баскевич О.С.; заявник і власник патенту ІГТМ НАН України. – № u2013 08029; замовл. 25.06.13; Надр. 25.11.2013. – Бюл. № 22.

INFLUENCE OF SURFACTANTS ON COAL-ROCK MASSIF ENERGY CAPACITY DESTRUCTION BY DYNAMIC LOAD

D. Saveliev

State Higher Education Institute “National Mining University”
prosp. K. Marks, 19, Dnipropetrovsk, 49005, Ukraine.

I. Kratkovsky, K. Ishchenko

M. S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy
of Science of Ukraine (IGTM, NASU)

vul. Simferopolskaya, 2-A, Dnepropetrovsk, 490005, Ukraine.

E-mail: kratkovsky@i.ua; ishenko_k@i.ua

The results of experimental studies of the surfactants effect (magnetized water, milk of lime, 10 % solution of baking soda and soda) at the energy capacity of destruction on coal-rock massif by varying intensity dynamic loads (impact, explosive). It was found that the purposeful change of strength properties of sandstone, limestone and coal by saturating their surfactants (SAS) has been a steady trend towards the reduction of the specific fracture energy. Especially noticeable influence of surfactants, inter alia, solutions having an alkaline reaction, the destruction of explosive loads of

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

quartz-bearing sandstones and limestone. In this case, the specific fracture energy is halved for sandstones and limestone to four times compare with samples not processed with surfactant. Processing of coal surfactant having an alkaline reaction, does not result in a substantial change in their capacity destruction by impact and explosion.

Key words: ugleporodnom array blow, the explosion, the surface-active substances, energy consumption of destruction.

REFERENCES

1. Pat. 95218 Ukraine MPK⁷ G01N 3/00, E21C 39/00 Assessment method destruction of energy capacity anisotropic rocks under different load types on models / Ishchenko, K.S., Konova, S.V., Saveliev, D.V., Kratkovsky I.L., Krukovska, V.V.; the applicant and the owner of the Patent IGTM NAS of Ukraine. – № u201407830, will order. 07/11/2014 subsoil. 12.10.2014. – Bull. Number 23.

2. GOST 21153.0-75. Rocks. Sampling and general methods of physical testing. Introduced to 07/01/75. – M.: Publishing House of Standards, 1976. – 20 p.

3. GOST 10181.2-81. Concrete mixtures. Methods for determining the density. Introduced to 01/01/81. – M.: Publishing House of Standards, 1981. – 25 p.

4. GOST 21153.2-84. Rocks. Method for determining the tensile strength in uniaxial compression. Introduced to 07/01/86. – M.: Publishing House of Standards, 1986. – 10 p.

5. GOST 21153.7-75. Rocks. The method of determining the velocity of elastic longitudinal and transverse waves. Introduced to 01/01/75. – M.: Publishing House of Standards, 1976. – 35 p.

6. Temporary guidelines for the rapid determination of the elastic properties of rocks by ultrasonic method to the raw core samples exploration wells RD / A.A. Yalansky, T.A. Palamarchuk, S.I. Skipochka et al. – L.: All-U.S.R.M.I, 1987. – 41 p.

7. Baron, L.I. Defining the properties of rocks / L.I. Baron, B.M. Loguntsov, E.Z. Posin. – M.: St. Sci. Tehn. publish. lit. on mining, 1962. – 224 p.

8. Doludareva, Ja.S. Influence of surfactants to modify the strength characteristics of rock / Ya.S. Doludareva [et al.] // Modern recourses and energy saving technologies in mining industry. – Vol. 1. – Kremenchug, 2012. – P. 8–16.

9. Greggs, D. Experiments bearing upon the orientation of quartz in deformation rocks / D. Greggs, J. Bell // Geol.Soc. American Bull. – 1938 – vol. 49. – P.1723–1746.

10. Fairbairn, H.W. Synthetic quartzite / H.W. Fairbairn // Am. Mineral. – 1950. – Vol. 35. – P. 735–748.

11. Pat. Ukraine MPK⁷ number 59776 F 42 D 3/04 Condenser explosive device (VPK-1) / Ishchenko K.S., Ishchenko O.K.; applicant and the owner of the Patent “NSU” – № u201014552; will order. 12/06/10; interior. 25.05.2011. – Bull. Number 10.

12. Pat. Ukraine MPK⁷ number 98546 F 42 D 1/05 Explosive device condenser / Ishchenko K.S., Ishchenko O.K.; applicant and the owner of the Patent “NSU” № 12302a2010; will order. 18/10/10; interior. 25.05.2012. – Bull. Number 10.

13. Pat. Ukraine №85757 MPK⁷ G01N 3/00, E21C 39/00 Assessment method structural changes anisotropic rocks under dynamic loading on models / Ishchenko K.S., Kratkovsky I.L., Baskevych O.S.; applicant and the owner of the Patent IGTM NAS of Ukraine. – № u201308029; will order. 25/06/13; Nadra. 25.11.2013. – Bull. Number 22.

Стаття надійшла 17.05.2015.