

УДК 622.235.6: 622.234.57

**ОЦЕНКА УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИИ
ПРИ РАЗРУШЕНИИ АНИЗОТРОПНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД
ДИНАМИЧЕСКИМИ НАГРУЗКАМИ РАЗЛИЧНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ**

Б. С. Ищенко, А. К. Ищенко

ГВУЗ «Национальный горный университет»

просп. Д. Яворницкого, 19, г. Днепр, 49005, Украина.

E-mail: bohdana.ishenko@gmail.com

Приведены результаты экспериментальных исследований физико-механических свойств, структурных особенностей вмещающих пород и рудной залежи Центрального месторождения урановых руд, отобранных в эксплуатационных блоках шахты Ингульская, ГП ВостГОК, г. Кропивницкий. Проведена оценка влияния анизотропии горных пород на удельную поверхностную энергию разрушения их динамическими нагрузками различной интенсивности (ударными, взрывными). Установлено, что при учете структуры пород и направления приложения нагрузки наблюдается устойчивый тренд в сторону уменьшения удельной энергии разрушения. Особенно заметно влияние структуры пород при разрушении взрывными нагрузками кварцсодержащих гранитов, мигматитов и альбититов, имеющих большое количество дефектов их строения. В частности, удельная энергия разрушения при образовании новой поверхности и диаметр среднего куска уменьшаются на 20-30 % в случае параллельного (||) приложения нагрузки относительно слоистости пород, а при разрушении альбититов при тех же условиях нагружения затраты энергии увеличиваются в 2 раза. По результатам взрывного разрушения кварцсодержащих пород сложного строения с явно выраженной анизотропией физико-механических свойств, построены зависимости распределения гранулометрического состава разрушенных образцов пород.

Ключевые слова: массив сложной структуры, горная порода, удар, взрыв, энергоемкость разрушения, гранулометрия.

**ОЦІНКА ПИТОМОЇ ПОВЕРХНЕВОЇ ЕНЕРГІЇ
ПРИ РУЙНУВАННІ АНІЗОТРОПНИХ ГІРСЬКИХ ПОРІД
ДИНАМІЧНИМИ НАВАНТАЖЕННЯМИ РІЗНОЇ ІНТЕНСИВНОСТІ**

Б. С. Іщенко, О. К. Іщенко

ДВНЗ «Національний гірничий університет»

просп. Д. Яворницького, 19, м. Дніпро, 49005, Україна.

E-mail: bohdana.ishenko@gmail.com

Наведено результати експериментальних досліджень фізико-механічних властивостей, структурних особливостей порід, що вміщують масив і рудного покладу Центрального родовища уранових руд, відібраних в експлуатаційних блоках шахти Інгульська, ДП СхідГЗК, м. Кропивницький; Проведено оцінку впливу анизотропії гірських порід на питому поверхневу енергію руйнування їх динамічними навантаженнями різної інтенсивності (ударними, вибуховими). Встановлено, що при врахуванні структури порід і напрямку їхнього навантаження спостерігається стійкий тренд в сторону зменшення питомої енергії руйнування. Особливо поміт-

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

ний вплив структури гранітів, мігматитів і альбітитів з вмістом кварцу при їх вибуховому навантаженні, що мають велику кількість дефектів їх будови. В даному випадку, питома енергія руйнування по створенню нової поверхні і діаметр середнього куска зменшується на 20-30%, а саме при паралельному (\parallel) навантаженню відносно шаруватості порід, а при руйнуванні альбітитів при тих же умовах навантаження витрати енергії збільшуються в 2 рази. За результатами вибухового руйнування порід складної будови і з явними ознаками анізотропії фізико-механічних властивостей, в яких присутній кварц, побудовані залежності розподілу гранулометричного складу зруйнованих зразків порід.

Ключові слова: масив складної будови, гірська порода, удар, вибух, енергоємність руйнування, гранулометрія.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. При разработке уранового сырья, наряду с увеличением полноты выемки полезного ископаемого, одной из важных проблем горнодобывающей промышленности, является сохранение целостности и безопасности эксплуатации экосистемы региона. Объясняется это тем, что урановые рудники, функционирующие в условиях непосредственного контакта с промышленными зонами, жилыми агломерациями, природными объектами, в том числе водными, сельскохозяйственными угодьями, оказывает на них негативное влияние [1–4].

Месторождения урановых руд, размещенные на территории Украины, являются частью металлогенической провинции Украинского щита (УЩ), крупнейшие из которых разрабатываются исключительно подземным способом с использованием энергии взрыва, так как урановое оруденение в границах тектоно-метасоматических зон локализуется исключительно в крепких ($f=14-20$ по шкале проф. М. М. Протодяконова) альбититах [5–6].

На территориях с развитой инфраструктурой зона горного отвода разрабатываемых урановых месторождений довольно часто расположена в непосредственной близости от промышленных и жилых объектов. В таких условиях при подработке верхних горизонтов сложной структуры урансодержащих пород (гранитов, мигматитов) с коэффициентом крепости $f = 12-20$, в частности, при проходке различных горных выработок и ведения очистных работ буровзрывным способом, необходимо учитывать негативное сейсмическое действие взрыва на охраняемые объекты [7–9]. Поскольку масштабы подземных массовых взрывов при камерной системе разработки весьма значительны, их сейсмическое действие может привести к катастрофическим последствиям.

Отсюда следует, что эффективность разработки камерными системами с закладкой выработанного пространства во многом будет зависеть от совершенствования существующих и разработки новых безопасных методов ведения буровзрывных работ, обоснованию их рациональных параметров для проходки выработок различного технологического назначения и ведения очистных работ в этих условиях.

Одним из путей улучшения безопасности и качества отбойки горных пород является учет структуры массива и анизотропии горных пород, существенно

влияющих на характер их разрушения взрывом. Традиционный путь снижения негативного влияния массовых взрывов в эксплуатационных блоках на охраняемые объекты – это уменьшение массы одновременно взрывааемых зарядов взрывчатых веществ (ВВ), но при этом не учитывают структуру массива горных пород (анизотропия физико-механических свойств взрывааемых пород, присутствие трещин с различными морфологическими характеристиками и интенсивностью), которые влияют на характер распространения сейсмозрывных волн. А между тем, учет особенностей трещинно-тектонического строения массива в разрабатываемых новых способах взрывной отбойки пород сложного строения может не только существенно повысить качество, безопасность проходки горных выработок и объемов добычи урановых руд на территориях с развитой инфраструктурой, но и значительно уменьшить сейсмическое действие массового взрыва (МВ). Причем, как установлено ранее [10–13], в анизотропном горном массиве в процессе эволюции сформировались удлиненные зоны пород с повышенной трещиноватостью, которые чередуются с зонами исключительно монолитных пород. Присутствие таких зон в разрабатываемом массиве существенно затрудняют ведение технологических операций в эксплуатационных блоках с использованием энергии взрыва. Необходимо отметить, что процессы, происходящие в массиве сложной структуры на контакте «ВВ-порода», недостаточно изучены. Кроме того, нет четкого представления о влиянии макроструктуры на характер распространения волн напряжений и их воздействия на охраняемые объекты (горные выработки, камеры, жилые здания и сооружения). Между тем, качество дробления горных пород в процессе их разрушения взрывом можно оценить, учитывая ряд факторов, таких как: энергия, передаваемая твердой среде, удельная поверхностная энергия разрушения, вновь образованная новая поверхность, диаметр среднего куска и коэффициент дробимости.

Следовательно, новые эффективные методы управления сейсмическим действием взрыва, направленные на снижение его негативного влияния на охраняемые поверхностные объекты и капитальные горные выработки, должны разрабатываться с учетом влияния на процесс распространения сейсмозрывных волн гидрогеологических условий (крепости, обводненности), трещинно-тектонического строения массива и анизотропии физико-механических свойств горных пород. Такой подход позволит обосновать пространственное расположение взрывных скважин в эксплуатационном блоке рудной залежи и откорректировать параметры буровзрывных работ (БВР).

В этой связи, вопросы, связанные с разработкой новых сейсмобезопасных методов отбойки горных пород на подрабатываемых территориях, основанных на учете трещинно-тектонического строения массива и анизотропии пород, остаются актуальными и в настоящее время.

Цель данной работы – экспериментальными исследованиями в лабораторных и полигонных условиях оценить удельную поверхностную энергию разрушения анизотропных горных пород сложной структуры динамическими нагрузками различной интенсивности.

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Для изучения и оценки удельной поверхностной энергии разрушения анизотропных горных пород динамическими нагрузками различной интенсивности разработана методика экспериментальных исследований, основные положения которой, базируются на известных методиках [14].

Она включает в себя бурение скважин, отбор образцов горных пород (кернов), определение физико-механических характеристик и деформаций пород. Для этого в эксплуатационном блоке рудника, подготовленному к разработке, или в местах проходки горных выработок бурят геологоразведочные скважины, осуществляют отбор ориентированных кернов или штуфов горных пород. Затем в лабораторных условиях на камнерезной машине алмазным диском формируют эталонные срезы на кернах для изготовления шлифов и моделей горного массива цилиндрической формы, а также плоских блоков для изготовления моделей в виде куба для разрушения на копре ударом свободно падающего груза, а других – взрывом заряда высокобризантного ВВ. После этого в части моделей горного массива, например керна или модели в виде куба, предварительно установив их в кондуктор, проводят ее центрирование, далее наносят разметку расположения взрывной полости с последующим бурением ее на глубину $2/3$ высоты модели, которая равна диаметру керна или $2/3$ высоты ребра модели в виде куба. Подготовленная часть моделей подвергается испытаниям по определению физико-механических характеристик горных пород, а другая часть моделей разрушается под действием динамических нагрузок различной интенсивности – на копре свободно падающего груза и взрывом заряда высокобризантного ВВ. Так, в моделях, подготовленных для разрушения взрывом, в зарядной полости формируют цилиндрический заряд ВВ в бумажном патроне с инициатором, размещают ее во взрывной камере, внутренняя поверхность которой футерована демпфирующей прокладкой и подрывают. Далее разрушенные свободно падающим грузом на копре, а также взрывом модели, вынимают из камеры и путем рассеивания на лабораторных ситах оценивают характер разрушения породы по гранулометрическим характеристикам, а удельную поверхностную энергию разрушения – по величине работы, затраченной на образование новой поверхности разрушенных образцов породы и структурных особенностей на изготовленных шлифах – методами оптической микроскопии.

Для исследований физико-механических характеристик и удельной поверхностной энергии разрушения вмещающих пород были отобраны штуфы близкой к форме куба с линейным размером ребра ≈ 350 мм и керны диаметром 55-57 мм на Центральном месторождении урановых руд (г. Кропивницкий), находящихся в тектоно-метасоматической зоне, имеющую трещинно-разломную структуру с ориентированием рудной залежи на север. Отбор образцов проводился в зонах не подверженных влиянию взрывных работ в очистных блоках 1а-2-10т, 1а-5-1, 1а-2-1т, 1б-2-3т, 1а-9-1 участка № 3, шахта «Ингульская», ГП «ВостГОК». Шахта разрабатывает линзовидные рудные залежи альбититов мощностью до 20 м с углом падения $60-85^{\circ}$, крепостью 10-15 баллов по шкале М.М. Протодяконова. Вмещающие породы представлены в виде монолитного

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

скального гранитного массива сложного тектонического строения, содержащего биотитовые гнейсы, мигматиты и альбититы, трудно взрывааемые, средней трещиноватости, крепостью от 12-18 и до 20 баллов. Описание образцов приведено в табл. 1.

Таблица 1 – Сведения об образцах пород, отобранных для исследований физико-механических свойств и удельной поверхностной энергии разрушения при различных видах динамического нагружения

№ по табл. каталога образцов ГП	Место отбора проб	Тип породы	Характеристика породы
1	шахта «Ингульская», ГП «ВостГОК», Центральное месторождение, Восточная зона, очистные блоки 1а-2-10т, 1а-5-1, 1а-2-1т, 1б-2-3т, 1а-9-1, участок № 3, гор.200-350 м	Гнейсы биотитовые	Сложного строения с включением зерен кварца, трудно взрывааемые, средней трещиноватости, крепкие
6		Мигматиты крупно-среднезернистые	Мигматиты, темно-серого цвета, крупно-средне зернистые, слоистые, крепкие
7		Альбититы по мигматитам	Альбититы по мигматитам темно серого цвета, сложного строения, слоистой структуры с включением их в гранитах, крупнозернистый, крепкий
9		Граниты пегматоидные	Граниты пегматоидные от светло-розового до темно-бурого цвета, массивной текстуры, кристаллической структуры с кварцем, крепкие
10		Альбититы по гранитам	Альбитит по гранитам розовый, мелкозернистой структуры с кварцем, крепкие, вязкие, трудно взрывааемые

Для детального анализа и получения прочностных характеристик, вмещающих пород и рудной залежи горного массива сложной структуры, таких как плотность, предел прочности на одноосное сжатие, скорость продольных и поперечных волн, коэффициент Пуассона и модуль Юнга, из отобранных проб и кернов (табл. 1) изготавливали модели для проведения их испытаний согласно действующим ГОСТам [15–16].

Изготовление моделей для лабораторных испытаний проводили на камнерезной машине с отрезным алмазным диском диаметром 250 мм. Для испытаний было подготовлено 15 моделей кубической формы с размером ребра 40 ± 2 мм (по 3 модели для каждого типа пород). Грани образцов обрабатывались

шлифовальным порошком, при этом их кривизна не превышала 0,05 мм. Контроль торцевых поверхностей (граней) образцов осуществляли часовым индикатором по двум взаимно перпендикулярным граням. Отклонения граней от параллельности составляла $\pm 0,1$ мм.

Подготовленные таким образом образцы были испытаны на одноосное сжатие на гидравлическом прессе ПР-500 апробированным методом определения предела прочности [17]. Контроль давления производился манометром, а замер поперечной деформации – тензодатчиками перемещения. Полученная информация в автоматическом режиме поступала на компьютерный комплекс для соответствующей обработки и построения диаграммы «напряжение-деформация».

Результаты испытаний заносились также в табличной форме в компьютерную базу данных, а предел прочности образца определяли по формуле:

$$\sigma_{сж} = \frac{P_{\max}}{S_0}, \text{ МПа} \quad (1)$$

где $S_0 = a^2$ – площадь сечения образца кубической формы, см^2 ; a – средний размер грани образца, см, а площадь сечения образца цилиндрической формы (керн) – $S_0 = \frac{\pi d^2}{4} \approx 0,785d^2$, d – диаметр образца, см.

Исследование акустических свойств горных пород – скорости распространения продольных и поперечных волн – проводилось на стенде, разработанном в ИГТМ НАН Украины [18]. В состав стенда входит переносной импульсный ультразвуковой прибор УК-10ПМ с пьезопреобразователями поршневого типа в защитном кожухе из аксиально-поляризованной керамики ЦТС или прибор серии УК-10ПМС с осциллографической индикацией и автоматизированной обработкой полученных осциллограмм скоростей продольных и поперечных волн с выдачей результатов на монитор, монтажный модуль для установки образца породы с датчиками. Технические характеристики стенда: частота повторения зондирующих импульсов не менее 25 Гц, амплитуда выходных импульсов 100-160 В, время пробега упругого импульса не менее $0,5 \cdot 10^{-6}$ с. Хороший контакт с пьезопреобразователями обеспечивался смазкой поверхности образцов техническим вазелином высокой степени очистки. При использовании прибора УК-10ПМ обработка результатов испытаний проводилась апробированным методом определения скорости распространения продольных и поперечных волн [19].

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.

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

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

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

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 [18]. Значения акустических и физико-механических характеристик испытываемых горных пород, приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Физико-механические свойства вмещающих пород и рудной залежи Центрального месторождения урановых руд (ш. Ингульская, г. Кропивницкий, ГП ВостГЭК)

№ сер. исп.	Тип породы	Плотность, $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	Предел прочности на сжатие, $\sigma_{сж}$, МПа	Скорость продольной волны, C_p , м/с	Скорость поперечной волны, C_s , м/с	C_s/C_p	Коэффициент Пуассона, ν	Модуль Юнга E, МПа	Коэф. крепости, f
*1	Гнейсы биотитовые	2,72	150,7	4800	3300	0,68	0,07	10,0	14-20
*2	Граниты пегматоидные	2,6	150	6300	3600	0,57	0,25	17,6	11-14
*3	Мигматиты крупно-среднезернистые	2,30	155	5300	3500	0,66	0,11	12,1	14-15
*4	Альбититы помигматитам	2,75	245	6250	3750	0,56	0,2	2,95	16-20
*5	Альбититы по гранитам	2,98	255	6380	3800	0,59	0,23	3,05	16-20

* – Приводятся средние значения по каждой серии испытаний.

Интенсивность динамического нагружения при взрывах в горных породах определяется типом ВВ, их удельным расходом, пространственным расположением скважин в массиве горных пород, направлением отбойки и конструкциями зарядов. Однако характер разрушения горных пород взрывом на контакте «ВВ–порода» сильно зависит также от их микроструктурных особенностей, характеризующихся векториальностью физико-механических свойств породообразующих минералов и плотностью дефектов их строения (внутризерновых и межзерновых микротрещин, наличием плоскостей спайности, различного рода включений и др.).

Для обоснования рациональных параметров буровзрывных работ и пространственного расположения взрывных скважин в массиве при взрывной отбойке анизотропных, сложной структуры и слабо трещиноватых горных пород для условий урановых месторождений Украины была проведена оценка удельной поверхностной энергии разрушения на образцах горных пород в зависимости от направления приложения нагрузки (\perp и \parallel слоистости).

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

Для проведения экспериментальных исследований в лабораторных и полигонных условиях на моделях была разработана методика, позволяющая оценить характер и удельную поверхностную энергию разрушения горных пород при свободно падающем грузе и взрыве.

В соответствии с разработанной методикой предусматривалось несколько серий экспериментальных исследований:

- исследование структурных особенностей вмещающих пород и рудной залежи на шлифах методами оптической микроскопии;
- оценка удельной поверхностной энергии разрушения образцов горных пород на копре при свободно падающем грузе;
- оценка удельной поверхностной энергии разрушения образцов горных пород при взрыве.

Реализация запланированных исследований проводилась на отобранных вне зоны действия динамических (взрывных) нагрузок штуфах (образцах) горных пород и геологоразведочных кернах диаметром 55-57 мм, которые приведены в табл. 1. Для этого в лабораторных условиях на камнерезной машине штуфы (блоки) и керны распиливали, формируя сначала эталонные срезы на кернах толщиной 1,5-2,0 мм для изготовления шлифов и на модели кубической и цилиндрической формы. Модели кубической формы изготавливали с размером ребра 40 ± 2 мм, а цилиндрической – 55 ± 2 мм высотой, равной диаметру керна, для изучения характера разрушения при воздействии на них динамических нагрузок различной интенсивности. Из общего количества подготовленных моделей отбирались образцы с явно выраженной анизотропией (слоистостью) и формировались в группы для проведения испытаний с приложением нагрузки перпендикулярно (\perp) и параллельно (\parallel) слоистости.

Из подготовленных срезов пород рудной залежи изготавливали шлифы, шлифуя и полируя их на шлифовальном станке. Оценку структурных особенностей, к которым относятся трещиноватость и слоистость, исследовали с помощью поляризационного микроскопа МП – 2 на прозрачных петрографических шлифах ураносодержащих гранитов, имеющем в своей структуре кварц, что позволило установить следующее:

– *гранит* розового цвета, мелко- и среднезернистый ураносодержащий (Центральное месторождение, г. Кропивницкий, рис. 1). Минералогический состав: главные минералы – кислый плагиоклаз (альбит-олигоклаз № 20-30) – 40-45%; амфиболы щелочного ряда зеленовато-бурые группы рибекита – 16 %; амфиболы бесцветные группы тремолит-актинолита – 4 %; кварц мозаичной структуры со следами грануляции и залеченными микротрещинами в виде субвертикальных полосок газово-жидких включений – 20-25 %; второстепенные минералы – кальцит в виде пелитоморфных зерен в полевых шпатах+апатит (часто расположенный внутри акцессорных минералов)+ незначительное количество биотита темно-бурого – 15 %; акцессорные минералы – ортит (внутри скоплений амфиболов)+торит в микротрещинах плагиоклаза+сфен (внутри акцессорных ортита и торита) – 5 %.

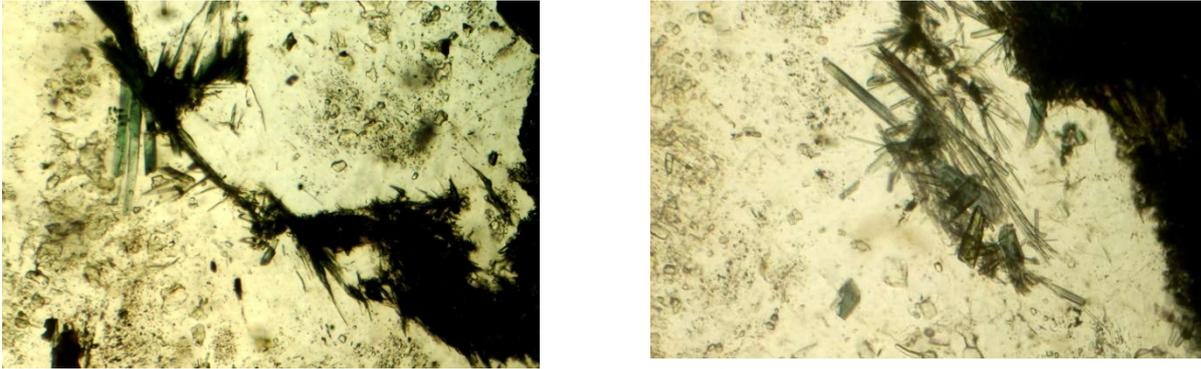


Рисунок 1 – Микрофотография структуры ураносодержащего розового гранита мелко- и среднезернистого (прозрачный шлиф, проходящий свет, увеличение 150×): темные зерна урановая смолка; светлые – кварц)

Для ураносодержащих гранитов сложной структуры характер их разрушения взрывом и ударом свободно падающего груза на микроуровне определяется видом структурных связей между элементами его строения, к которым относятся трещиноватость и слоистость. Поскольку кварц в гранитах кристаллизуется из расплава последним [12], он является своего рода «цементом», связующим между собой зерна других минералов, поэтому характер разрушения гранитов на микроуровне зависит от прочности «кварцевого цемента». С увеличением количества микротрещин в зернах кварца интенсивность разрушения гранитов динамическими нагрузками может возрастать [13].

Исследования микротрещиноватости в зернах кварца проведены на изготовленных прозрачных петрографических шлифах с помощью поляризационного микроскопа, снабженного цифровым фотоаппаратом с высокой разрешающей способностью, что позволило получить качественные контрастные фотоснимки (рис. 2) для определения интенсивности развития микротрещин в исследуемой породе, выраженной в количестве трещин, приходящихся на 1 см длины кварцевого зерна.

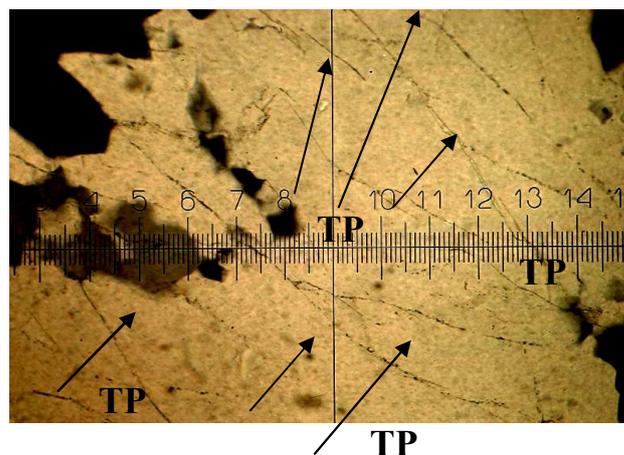


Рисунок 2 – Микрофотография трещин в зернах кварца ураносодержащего розового гранита, Центральное месторождение (увеличение 240×)

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ
РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

Результаты изучения микроструктурных особенностей ураносодержащих гранитов Центрального месторождения показали, что интенсивность микротрещиноватости гранитов составляет в среднем 60-75 микротрещин на сантиметр и они на микроуровне характеризуются высокой плотностью дефектов внутреннего строения (в виде микротрещин в зернах кварца).

Следующим этапом исследований было разрушение подготовленной части образцов с ребром 40 ± 2 мм на вертикальном копре (рис. 3) ударом свободно падающего груза с высоты 1 м массой 21, 4 кг. Энергия сбрасываемого груза, таким образом, составляла 210 Дж. При этом, приобретенная грузом энергия в момент удара полностью трансформируется в работу разрушения образца горной породы. Характеристики образцов, подготовленных к исследованиям, приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Характеристики образцов

№ по табл. каталога образцов ГП	Материал образцов	Условия нагружения	Усредненный размер ребра образца, h_{cp} , см	Объем, V , см ³	Масса, m , г	Плотность, ρ , г/см ³	Исходная поверхность, S_0 , см ²	
1	Гнейсы биотитовые	копер	4,0	64,0	227,0	3,54	96,0	
		взрыв	4,0	64,0	207,0	3,23	96,0	
6	Мигматиты крупно-среднезернистые	копер	⊥	3,95	61,6	232,0	3,76	93,6
				4,0	64,0	242,5	3,6	96,0
		взрыв	⊥	4,0	64,0	230,0	3,6	96,0
				4,0	64,0	229,0	3,57	96,0
7	Альбититы по мигматитам	копер	⊥	3,96	62,4	225,0	3,6	94,0
				3,96	62,4	225,0	3,6	94,0
		взрыв	⊥	3,94	61,5	232,0	3,7	93,1
				4,0	64,0	225,0	3,5	96,0
9	Граниты пегматоидные	копер	4,0	64,0	177,0	2,76	96,0	
		взрыв	4,0	64,0	170,0	2,76	96,0	
10	Альбититы по гранитам	копер	⊥	4,0	64,0	227,0	3,54	96,0
				4,0	64,0	220,0	3,43	96,0
		взрыв	⊥	4,0	64,0	215,0	3,36	96,0
				4,0	64,0	207,5	3,24	96,0

Исследования гранулометрического состава разрушенных ударом и взрывом образцов горной породы с целью установления величины вновь образованной поверхности производили методом ситового анализа с помощью двух наборов лабораторных сит с размерами ячеек 12,0; 10,0; 7,0; 5,0; 3,0; 2,0; 1,0; 0,50 и 0,25 мм – для оценки грансостава на макроуровне и набора сит с ячейками 0,4; 0,315;

0,16; 0,10 и 0,05 мм, что позволяло учитывать роль неоднородностей, присущих породе на микроуровне.



Рисунок 3 – Общий вид вертикального копра для разрушения образцов горных пород свободно падающим грузом:

- 1 – станина копра;
- 2 – образец горной породы;
- 3 – груз;
- 4 – направляющие копра;
- 5 – соединительный трос;
- 6 – шкив для пропуска подъемного троса

Вновь образованная поверхность разрушенных образцов, после разделения их на фракции для определения гранулометрического состава, рассчитывалась по известной формуле [20]:

$$S_n = \frac{6}{\rho} \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{d_i} - S_0, \quad (3)$$

где ρ – плотность образцов горных пород (г/см^3); m_i , d_i – соответственно масса (г) и диаметр (см) среднего куса i -той фракции; S_0 – начальная поверхность образца (см^2), а диаметр среднего куса определяли по формуле

$$d_{\text{сеп}} = \sum_{i=1}^i w_i d_i, \quad (4)$$

где $w_i = m_i/m$ – содержание i -ой фракции или i -того куса, в долях единицы; m_i – масса i -ой фракции, г; m – общая масса всех фракций, г; d_i – средний размер i -го куса или i -ой фракции, см.

Энергоемкость образования единицы новой поверхности характеризует величина, называемая удельной поверхностной энергией (γ). При разрушении образцов горных пород ударом свободно падающего груза энергия, затрачиваемая на образование единицы вновь образованной поверхности, рассчитывается по формуле:

$$\gamma_y = \frac{mgh}{S_{ny}}, \quad (5)$$

где S_{ny} – новая вновь образованная поверхность при ударе, см^2 ; m – масса груза, 21,4 кг; g – ускорение свободного падения, 9,8 м/с; h – высота падения груза, 1,0 м.

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

При разрушении таких же по размеру образцов горных пород взрывом зарядов взрывчатого вещества массой M и теплотой взрыва Q (кДж/кг) энергия, затрачиваемая на образование единицы новой вновь образованной поверхности – γ_v , рассчитывалась следующим образом:

$$\gamma_v = \frac{MQ}{S_{nv}}, \quad (6)$$

где S_{nv} – новая вновь образованная поверхность при взрыве, см^2 ; M – масса высокобризантного ВВ (тэна) – $150 \cdot 10^{-6}$ кг; Q – теплота взрыва ВВ (тэна) = $5908 \cdot 10^3$ Дж/кг, а степень дробления образцов породы по формуле:

$$K_d = h_{cp} / d_{cp}, \quad (7)$$

где h_{cp} – усредненный размер ребра образца модели, см; d_{cp} – диаметр среднего куска.

Третьей серией экспериментов предусматривалось проведение оценки удельной поверхностной энергии разрушения моделей горных пород по результатам их дробления (табл. 3) взрывом заряда высокобризантного ВВ (тэна) с учетом их структурных особенностей (анизотропии), помещенным во взрывную полость вместе с инициатором (рис. 4). Образец породы размещали во взрывной камере (рис. 5), внутренняя поверхность которой футерована резиновой прокладкой для уменьшения вторичного дробления, и дистанционно подрывали конденсаторным взрывным прибором. Электронный взрывной прибор конденсаторный (ВПК, ВПК-1) разработан в ГВУЗ «НГУ» совместно с ИГТМ НАН Украины, приоритет которого защищен патентами Украины [21, 22].

Разрушение моделей осуществлялось в полигонных условиях ГП «Научно-производственное объединение «Павлоградский химический завод» (ГП «НПО «ПХЗ»). Масса заряда ВВ во всех сериях экспериментов составляла $150 \cdot 10^{-6}$ кг, удельный расход ВВ – $2,3 \text{ кг/м}^3$. Всего было подорвано 32 модели (по 3 модели в каждой серии + 1 контрольная для всех исследуемых типов пород).

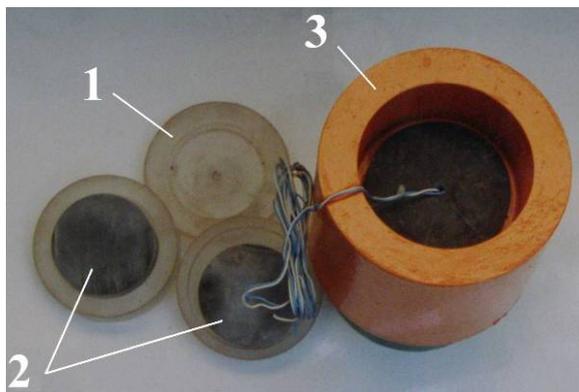


Рисунок 4 – Общий вид кондуктора, образца горной породы и взрывной камеры: 1 – кондуктор; 2 – образец горной породы; 3 – взрывная камера



Рисунок 5 – Образец горной породы во взрывной камере после разрушения: 1 – образец; 2 – взрывная камера; 3 – демпфирующая прокладка

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

При обработке granulometricкого состава разрушенной модели проводился анализ дробленого материала по следующим основным показателям: интенсивность разрушения модели в целом, определение общей массы разрушенной модели, диаметр среднего куска и площадь новой вновь образованной поверхности.

По рассчитанным значениям новой вновь образованной поверхности разрушенных на копре ударом свободно падающего груза и взрывом заряда ВВ образцов вмещающих пород и рудной залежи определены основные энергетические показатели: удельная поверхностная энергия разрушения, диаметр среднего куска и степень дробления образцов горной породы по формулам (3), (4), (5), (6) и (7). Результат экспериментальных исследований по оценке энергетических показателей разрушения вмещающих пород Центрального месторождения урановых руд (г. Кропивницкий) приведен в табл. 4, а кумулятивные кривые распределения granulometricких характеристик результатов дробления при различных условиях нагружения – на рис. 6 и рис.7.

Таблица 4 – Результаты энергетических показателей разрушения вмещающих пород и пород рудной залежи Центрального месторождения урановых руд (г. Кропивницкий) зарядом ВВ и свободно падающим грузом

№ по табл. каталога образцов ГП	Материал образцов	Условия нагружения	Усредненный размер ребра образца, h_{cp} , см	Вновь образованная поверхность, $см^2, S_n$	Средний размер куска, d_{cp}	Удельная поверхностная энергия разрушения, Дж/см ²	Степень дробления образца $K_d = h_{cp}/d_{cp}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	
1	Гнейсы биотитовые	копер	4,0	1002,1	0,9	0,2	4,40	
		взрыв	4,0	1059,4	0,82	0,83	4,87	
6	Мигматиты крупно-средне-зернистые	копер	⊥	3,95	1219,0	0,90	0,17	4,40
			∥	4,0	1506,0	0,86	0,14	4,65
		взрыв	⊥	4,0	1512,5	0,82	0,60	4,90
			∥	4,0	1767,3	0,72	0,50	5,55
7	Альбититы по мигматитам	копер	⊥	3,96	951,6	0,97	0,22	4,0
			∥	3,96	1195,8	0,96	0,74	4,12
		взрыв	⊥	3,94	916,3	0,93	0,96	4,23
			∥	4,0	1113,4	0,82	0,80	4,90
9	Граниты пегматоидные	копер	4,0	1740,6	0,82	0,12	4,87	
		взрыв	4,0	3004,4	0,47	0,30	8,50	
10	Альбититы по гранитам	копер	⊥	4,0	720,0	0,98	0,30	4,00
			∥	4,0	915,7	0,96	0,22	4,20
		взрыв	⊥	4,0	601,4	1,00	1,50	4,00
			∥	4,0	860,0	0,85	1,00	4,70

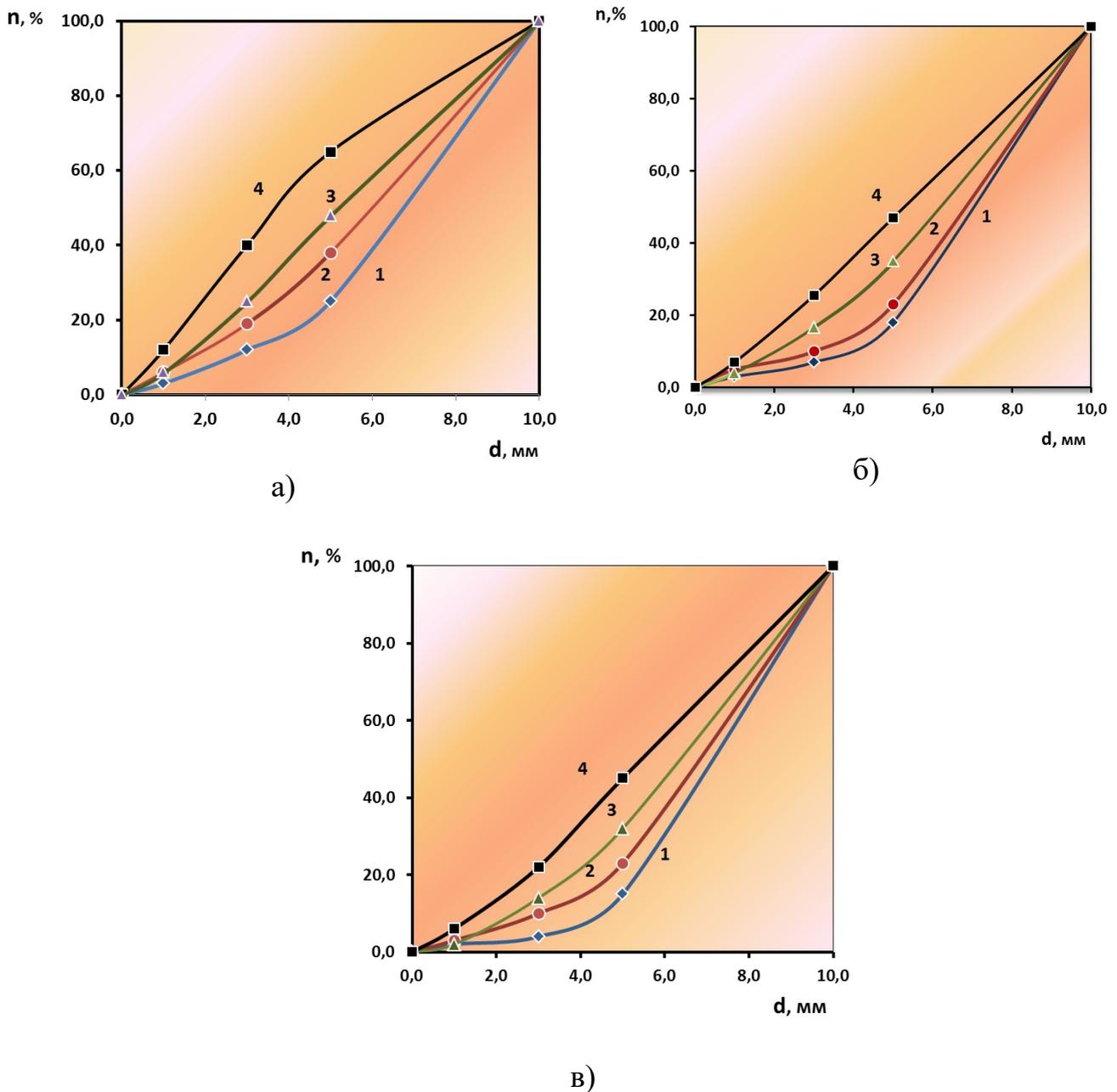


Рисунок 6 – Кумулятивні криві розподілення содержания фракцій дроблення n от их размера d разрушенных динамическими нагрузками различной интенсивности и условий нагружения моделей анизотропных горных пород – а) мигматиты; б) альбититы по мигматитам; в) альбититы по гранитам: 1, 2 – на копре свободно падающим грузом, \perp и \parallel слоистости и 3, 4 – зарядом ВВ, \perp и \parallel слоистости, соответственно

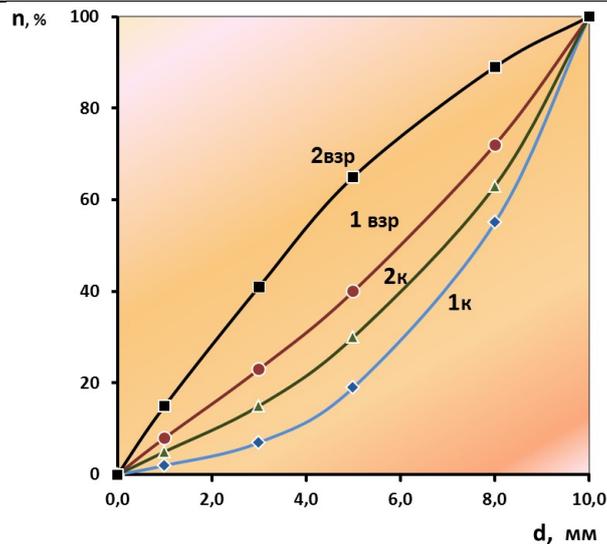


Рисунок 7 – Кумулятивні криві розподілення содержания фракцій дроблення n от их размера d , разрушенных динамическими нагрузками различной интенсивности (копер, взрыв) моделей горных пород сложной структуры: гнейсы биотитовые – 1 к; 1 взр. и граниты пегматоидные – 2 к и 2 взр., где: к – копер и взр.– взрыв

ВЫВОДЫ. Эксперименты по исследованию влияния структурных особенностей вмещающих пород и рудной залежи Центрального месторождения урановых руд на удельную поверхностную энергию их разрушения динамическими нагрузками (ударными и взрывными), позволили установить следующее.

Анализ гранулометрических и энергетических характеристик образцов вмещающих пород и рудной залежи, разрушенных свободным ударом и взрывом, показал, что структурные особенности пород существенно влияют на характер их разрушения.

Так в частности, при разрушении мигматитов, альбититов по мигматитам, пегматоидных гранитов, имеющих в своей структуре в контактных зонах кварц с дефектами строения в виде трещин, затраты энергии на разрушение, определенной по вновь образованной поверхности и диаметру среднего куска на 20-30 % меньше, чем у альбититов по гранитам, разрушенных взрывными нагрузками. Эти породы являются вязкими и затраты энергии на их дробление в ближней зоне и разупрочнению породообразующих минералов значительны (см. табл. 4).

Заметное влияние на характер разрушения пегматоидных гранитов, крупно-среднезернистых мигматитов, оказывает кварц, присутствующий в составе этих анизотропных пород в виде зерен с большим количеством дефектов строения – микротрещин. При действии взрывных нагрузок удельная энергия разрушения уменьшается с 0,50 до 0,30 Дж/см², а альбититов по гранитам – с 1,5 до 1,0 Дж/см² при различных условиях нагружения.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования позволили установить, что при разрушении крепких анизотропных пород и рудной залежи, учет структуры массива для обоснования рациональных параметров буровзрывных работ, корректировки пространственного расположения взрывных скважин

ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

в массиве, создает основу для разработки новых энергосберегающих способов отбойки ураносодержащих пород, позволяющих снизить сейсмическое воздействие на здания, сооружения, расположенные в зоне горного овода и непосредственной близости от него, что в конечном итоге обеспечивает безопасное проживание на территориях с развитой инфраструктурой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шемякин Е.И. Сейсмический эффект подземного взрыва // Горн. журн. – 2003. – №1. – С. 11–15.
2. О критериях сейсмической опасности промышленных взрывов / В. В. Бойко, А. А. Кузьменко, Т. В. Хлевнюк. // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія «Гірництво»: Зб. наук. праць. – № 12. – 2005. – С. 45–52.
3. Визначення оптимальних параметрів сейсдобезпечного виконання буропідривних робіт на Піщанському родовищі мігматитів і гранітів. / І.Л. Гуменик, О.П. Стрілець, В.Ю. Швець. // Сучасні ресурсоенергосберігаючі технології гірничого виробництва. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 2(10). – С. 112–119.
4. Вовк О.А. Параметры сейсмических волн при действии сосредоточенного заряда // Уголь Украины. – 2013. – № 7. – С. 42–45.
5. Генетические типы и закономерности размещения урановых месторождений Украины / Под ред. Я.Н. Белевцева и В.Б. Коваля. – К.: Наук. думка, 1995. – 396 с.
6. Добыча и переработка урановых руд в Украине / Под ред. А.П. Чернова – К.: «АДЕФ–Украина», 2001. – 238 с.
7. Ляшенко В. И., Кислый П.А. Обоснование сейсдобезопасных параметров взрывов при подземной разработке приповерхностных запасов месторождения под городской застройкой // Изв.ВУЗов горн. журн. – 2015. – № 3. – С. 84–93.
8. Обеспечение сейсмической безопасности при производстве взрывных работ под городской застройкой / В.И. Ляшенко, Г.В. Мельник, А.В. Малоок // Изв. вузов Горн.журн. – 2011. – № 5.– С. 68–76.
9. Пуголовкин В.Н., Романов И.П. Оценка сейсмического действия взрыва на подземные горные выработки // Горн. журн, – 2006 – № 1. – С. 90–93.
10. Механика взрывного разрушения пород различной структуры / Э.И. Ефремов, В.Д. Петренко, Н.П. Рева, И.Л. Кратковский. – Киев: Наук.думка, 1984. – 192 с.
11. Кратковский, И.Л. Влияние метасоматоза на кливаж гранитоидов // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / Ин-т геотехн. мех. НАН Украины. – Вып. 47. – Днепропетровск. – 2004 – С. 141–151.
12. Петров В.П. Магма и генезис магматических пород – М.: Недра, 1972. –135с.
13. Ищенко К.С., Кратковский И.Л. Экспериментальные исследования влияния микроструктуры на характер взрывного разрушения урановых руд Ватутинского месторождения // Науковий вісник ДВНЗ «НГУ». – Дніпропетровськ: 2008. – № 8. – С. 58–64.
14. 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.

Сучасні ресурсоенергосберігаючі технології гірничого виробництва. Випуск 1/2016(17).

15. 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.
16. ГОСТ 10181.2–81. Смеси бетонные. Методы определения плотности. Введен с 01.01.81. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 25 с.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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.

EVALUATION OF THE SPECIFIC SURFACE ENERGY IN THE PROCESS OF DESTRUCTION ANISOTROPIC ROCKS BY DYNAMIC LOADS OF VARYING INTENSITY

B. Ishchenko, O. Ishchenko

State Higher Educational Institution «National Mining University»

prosp. D. Yvornichkogo, 19, Dnipro, 49005, Ukraine.

E-mail: Kam1c@ua.fm; bohdana.ischenko@gmail.com

Purpose. In laboratory and field conditions evaluate the specific surface energy in the process of destruction anisotropic rocks by dynamic loads of varying intensity. **Methodology.** The tests of the host rocks and ore deposits of the Central deposit of uranium ore using proven research methods. The selected operational units in Ingulskaya mine VostGOK GP, Kirovograd, to determine the physical and mechanical properties, their structural characteristics and evaluation of the specific surface energy in the destruction process of anisotropic rocks by dynamic loads of varying intensity. The producing block of the mine, blocked out, or in mine workings exploration wells are drilled, selects oriented core samples for the purpose. Then, in the laboratory on stone-cutting machine with diamond blade, forming reference sections in the cores for the production of thin and massif models, cylindrical and flat blocks for the production of models in the form of a cube to break the blow of a freely falling mass, and others for the explosion of high-order explosive. **Results.** According to the research it found that, taking into account the structure of the rocks and the load application direction has been a steady trend towards the reduction of the specific energy of destruction. Especially appreciable influence of rock structure in the process of destruction by explosive of quartz-bearing granites, migmatites and albitites having a large number of defects in structure. In particular, the specific ener-

gy of destruction in the formation of the new surface and the diameter of the middle piece are reduced by 20-30% in the case of parallel (||) application of the load regarding the stratification of rocks, and in the process of destruction albitites under the same loading conditions, energy costs increase by 2 times. **Originality.** Analysis of grain size and energy characteristics of host rocks samples and ore deposits, destroyed a freely falling mass and the explosion, showed that the nature and patterns of destruction significantly affect the structural features of rocks. In particular it found that in the process of destruction migmatites, albitites by migmatites, pegmatite granite by explosive, having in its structure on the contact "explosive-rock" quartz and defects of structure - microcracks, energy costs for destruction, diameter of the middle piece on 20-30% less than in the case where, under the same conditions, were destroyed albitites on a granite. These rocks are viscous and energy costs of their crushing in the near field and the softening of rock-forming minerals are significant. **Practical value.** Studies have shown that in the destruction of strong anisotropic rocks of complex structure and ore deposits, keeping the structure of the array to justify the rational parameters of drilling and blasting operations, including, as an adjustment of the spatial location of the blast holes in the array, and the development of new designs of hole charges, provide the basis for the development of new energy-saving ways of breaking rocks, which leads to lower seismic effects on buildings, structures and security of residence in the territories with a developed infrastructure. **References** 21, tables 4, figures 7.

Key words: complicated structure of rock, rock, freely falling mass, explosion, the energy intensity of destruction, particle size.

REFERENCES

1. Shemyakin, E.I. (2003), "Seismic effect of an underground explosion", *Mining Journal*, no.1, pp.11–15.
2. Boiko, V.V., Khlevnyuk, T.V., Kuzmenko, A.A. (2005), "On criteria for seismic hazard industrial explosion", *Bulletin of the National Technical University of Ukraine "KPI"*. A series of "Mining": Collection of scientific papers, no. 12, pp. 45–52.
3. Gumenick, I.L., Sagittarius, A.P., Shvets, V.Y. (2012), "Determination of the optimal parameters of safe performance of seismic blasting on Peshanskii field migmatites and granites", *Modern resource-saving technologies of mining*. Sci.-Tech. collected works, vol. 10, no.2, pp. 112–119.
4. Vovk, O.A. (2013), "The parameters of seismic waves under the action of concentrated charge", *Coal of Ukraine*, no.7, pp.42–45.
5. Belevtsev, Ya.N., Koval, V.B. (1995), "Genetic types and patterns of distribution of uranium deposits in Ukraine", Ukraine, Kiev, *Scientific though*, 396 p.
6. Cherepanov, A.P. (2001), "Mining and processing of uranium ores in Ukraine", *ADEF-Ukraine*, 238 p.
7. Lyashenko, V.I., Sour, P.A.(2015), "Justification seismic safe parameters of explosions at underground mining of surface deposits of reserves under the urban development", *Proceedings of Higher Education Mining Journal*, no.3, pp.84–93.
8. Lyashenko, V.I., Melnik, G.V., Malook, A.V. (2011), "Ensuring seismic safety in the production of blasting under the urban development", *Proceedings of Higher Education Mining Journal*, no.5, pp. 68–76.

9. Pugolovkin, V.N., Romanov, I.P. (2006), "Assessment of the seismic action of the explosion at the underground mine workings", *Mining Journal*, no.1, pp.90-93.
10. Efremov, E.I., Petrenko, V.D., Reva, N.P., Kratkovsky, I.L. (1984), "Technique explosive destruction of rocks of different structures", Ukraine, Kiev *Scientific thought* – 192 p.
11. Kratkovsky, I.L. (2004), "The impact on the cleavage metasomatic granitoids", *Geotechnical mechanic*. Collection of scientific papers. *Institute of Geotechnical Mechanics of National Academy of Sciences of Ukraine*. Ukraine, Dnepropetrovsk. Vol. 47, pp. 141–151.
12. Petrov, V.P. (1972) "Magma and rocks magma genesis", Moskow, *Scientific thought* – 135 p.
13. Ishchenko, K.S., Kratkovsky, I.L. (2008) "Experimental studies of the microstructure influence on the nature of the explosive destruction of uranium ore deposits Vatutinsky", *Scientific Bulletin of National Mining University*. Ukraine, Dnepropetrovsk. No. 8, pp. 58–64.
14. 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.
15. 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.
16. GOST 10181.2-81. Concrete mixtures. Methods for determining the density. Introduced to 01/01/81. – M.: Publishing House of Standards, 1981. – 25 p.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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" № a201012302; will order. 18/10/10; interior. 25.05.2012. – Bull. Number 10.

Стаття надійшла 24.06.2016.