

УДК 622.235

Я.С. Долударева¹, канд. техн. наук, доц.,
Т.Ф. Козловская¹, канд. хим. наук, доц.,
В.Д. Лемижанская¹, А.И. Комир²

1 – Кременчугский национальный университет им. М. Остроградского, г. Кременчуг, Украина, e-mail: tfk58@kdu.edu.ua
2 – Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, г. Харьков, Украина, e-mail: tank-gun@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ В ЗОНЕ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ИХ ДРОБЛЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСНЫХ НАГРУЗОК

Ya.S. Doludareva¹, Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof.,
T.F. Kozlovskaya¹, Cand. Sci. (Chem.), Assoc. Prof.,
V.D. Lemizhanskaya¹, A.I. Komir²

1 – M. Ostrohradskyi Kremenchug National University,
Kremenchug, Ukraine, e-mail: tehm@kdu.edu.ua
2 – V.N. Karazin Kharkov National University, Kharkov,
Ukraine, e-mail: tank-gun@mail.ru

INFLUENCE OF THE SURFACE-ACTIVE SUBSTANCES IMPLEMENTATION IN THE ROCK FAILURE AREA ON THE INTENSITY OF ROCK CRUSHING BY MEANS OF THE PULSE LOADS

Цель. Оценка влияния поверхностно-активных веществ (ПАВ) в зоне разрушения горных пород на интенсивность их дробления при воздействии импульсных нагрузок.

Методы. Взрывное неразрушающее импульсное нагружение образцов лабрадорита с их последующим односторонним сжатием.

Результаты. Попадание поверхностно-активного вещества в микротрещины в зоне разрушения снизило предел прочности породы при статических нагрузках в среднем на 23–25 %. Полученные результаты свидетельствуют о том, что вследствие уменьшения поверхностной энергии на контактах минеральных образований, под действием поверхностно-активных веществ (ПАВ), существенно снижается прочность горных пород. В процессе исследований установлено влияние среды между зарядом взрывчатых веществ (ВВ) и стенкой шпура на эффективность передачи энергии взрывного воздействия и интенсивность дробления горной породы. При заполнении шпура водой или раствором ПАВ в результате взрывного воздействия происходит разрушение породы на множество мелких осколков, что свидетельствует о более высокой эффективности передачи энергии взрыва в разрушаемую часть массива. При взрывной отбойке трещиноватых обводненных массивов часть энергии взрыва расходуется на изменение кинетической энергии движения жидкости в пустотах и трещинах массива, что зависит от степени его обводненности и трещиноватости.

Научная новизна. Обосновано, что поверхностное натяжение растворов ПАВ в трещинах является адгезивно-адсорбционным процессом, т.е. происходит взаимодействие молекул поверхностно-активного вещества с поверхностью породы в трещине за счет сил Ван-дер-Ваальса, водородных связей, электростатических сил. Главной движущей силой этого процесса является снижение статического модуля упругости горной породы за счет действия сил поверхностного натяжения ПАВ и увеличения динамического модуля упругости, результатом чего является изменение пластичности горной породы, а это, в свою очередь, облегчает ее дробление и улучшает качество подготовки горной массы. Установлено, что неразрушающее взрывное воздействие приводит к увеличению плотности дефектов кристаллической решетки и снижению прочности породы.

Практическая значимость. Полученные результаты позволят при использовании растворов ПАВ различной концентрации регулировать энергию взрывного импульса для целенаправленного дробления горных пород на открытых разработках полезных ископаемых.

Ключевые слова: прочностные характеристики, смыкание микротрещин, поверхностно-активные вещества, энергетические затраты, взрывное воздействие, поверхностная энергия, зона разрушения, интенсивность дробления

Введение. Процессы разрушения и дробления горных пород при механических воздействиях как статических, так и динамических, зависят от ряда факторов, а именно: физико-механических свойств разрушаемой породы; видов механического воздействия (статическое, динамическое); условий передачи энергии внешнего воздействия разрушаемой породе.

Физико-механические свойства горных пород определяют энергетические затраты процессов разрушения, дробления и измельчения. При этом следует отметить, что для горных пород характерны

многочисленные несовершенства и дефекты структуры, существенно влияющие на их прочностные характеристики и энергетические затраты при механической переработке горной массы.

Эффективность буровзрывных работ в значительной степени зависит от свойств и состояния разрабатываемого массива. Одним из способов управления процессом разрушения является направленное изменение свойств и состояния горных пород.

Изменения механических свойств пород можно достичь при использовании поверхностно-активных веществ (ПАВ), действие которых основано на адсорбционном понижении поверхностной энергии, что облегчает развитие трещин – эффект Ребиндера. Теоретические

и экспериментальные исследования (В.В. Сынбулатов и др.) показывают, что адсорбция активных молекул из раствора происходит на свободных поверхностях и, прежде всего, на поверхности трещин [1]. Поэтому поверхностно-активные вещества влияют на процесс образования и изменения параметров микротрещин.

Анализ предыдущих исследований. Насыщение пород активными растворами определяется величиной и характером пористости пород, их начальной влажностью, типом раствора ПАВ, напряженным состоянием массива и др. [2, 3]. Проникновение в породу ПАВ способствует процессу развития микротрещин и изменению их параметров [1], что снижает величину скорости упругой волны в горной породе. Также необходимо отметить, что на изменение скорости упругой волны оказывают влияние два противоположно действующих фактора [3]. С одной стороны, за счет вытеснения газов из пор жидкостью повышается плотность породы, что приводит к росту скорости волны, с другой стороны – увеличение степени трещиноватости породы под действием ПАВ приводит к уменьшению скорости волны.

Кинетика насыщения горных пород растворами ПАВ реализуется в три стадии [3], но, в конечном

итоге, они определенным образом ориентируются на межфазных поверхностях раздела, понижая поверхностную энергию и прочность породных образований, изменяя структуру межфазных поверхностей.

Цель работы. Оценка влияния поверхностно-активных веществ в зоне разрушения горных пород на интенсивность их дробления при воздействии импульсных нагрузок.

Материалы и результаты исследований. Экспериментальные исследования влияния поверхностно-активных веществ в зоне разрушения на протекание процессов дезинтеграции горных пород проводили в лаборатории кафедры технической механики Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского на моделях, размерами 40x40x80 мм, из лабрадорита. Для создания взрывного нагружения в центре торцевой грани каждой модели бурили шпуров диаметром 5 мм и глубиной 54 мм.

В первой серии экспериментов пять произвольно выбранных моделей – эталонные образцы – разрушали статической нагрузкой, создаваемой испытательной машиной EDZ–100, и определяли предел прочности при одноосном сжатии параллельно оси шпура. Результаты исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1

Предел прочности эталонных образцов из горных пород

№ п/п	Предельная нагрузка при одноосном сжатии, кН	Предел прочности при одноосном сжатии, МПа	Среднее значение предела прочности при одноосном сжатии, МПа	Отклонение предела прочности образцов от среднего значения, %	Уточненный предел прочности, МПа
1	162	101,25	102,5	1,2	102,5
2	192	120		17	
3	186	116,25		13,4	
4	142	88,75		13,1	
5	138	86,25		15,8	

Во второй серии экспериментов изучали изменение прочностных характеристик горных пород под воздействием ПАВ, для чего в шпуров заливали поверхностно-активное вещество SARMA (состав: анионоактивные ПАВ 15–30%, неионогенные ПАВ <5%) и выдерживали его там в течение одного часа, после чего образцы нагружали статической нагрузкой до разрушения, определяя их предел прочности.

В процессе возрастания нагрузки микротрещины частично раскрывались, что способствовало более глубокому проникновению ПАВ вглубь материала модели.

Попадание поверхностно-активного вещества в микротрещины в зоне разрушения снизило предел прочности породы при статических нагрузках, в среднем, на 23–25%. Результаты экспериментов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Изменение предела прочности горных пород при статическом нагружении и наличии ПАВ в зоне разрушения

№ п/п	Время нахождения ПАВ в шпуре, час	Предельная нагрузка при одноосном сжатии, кН	Предел прочности при одноосном сжатии, МПа	Среднее значение предела прочности при одноосном сжатии, МПа	Отклонение предела прочности образцов от среднего значения, %	Уточненный предел прочности (после исключения вылетов), МПа
1	1	132	82,5	75,9	8,7	77,09
2		109	68,13		10	
3		79	49,38 *		34,9	
4		129	80,63		6,2	
5		158	98,75		30	

* – промах.

В третьей серии экспериментов устанавливали динамику изменения прочностных характеристик лабрадорита с течением времени после воздействия взрывных неразрушающих нагрузок.

Эксперименты проводили на моделях 40x40x40 мм. В центре одной грани каждой модели сверлили шпуров диаметром 5 мм и глубиной 25 мм. В шпуров помещали заряд тэна массой 10 мг, иници-

руемый микродетонатором. Указанные массы зарядов тэна являлись максимальными, при взрывах которых, в шпурах без забойки, в материале моделей не возникли видимые нарушения сплошности при отсутствии в зоне разрушения поверхностно-активных веществ. Затем, через фиксированные промежутки времени по-

сле взрыва, определяли предел прочности материала моделей при одноосном сжатии.

Установлено, что неразрушающее взрывное воздействие приводит к увеличению плотности дефектов кристаллической решетки и снижению прочности породы (табл. 3).

Таблица 3

Изменение предела прочности образцов, размерами 40x40x40 мм, с течением времени после воздействия на них импульсной нагрузки

	Номера исследуемых образцов										t, час	$\langle \sigma \rangle$, МПа	$\Delta \sigma$, МПа	δ , %
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
P, кН	239	218	224	195	164	135	186	205	200	210	Эталонный образец	128	13	10,4
σ , МПа	149,38	136,25	140	121,88	102,5	84,38*	116,25	128,13	125	131,25				
P, кН	154	168	148	174	245	132	122	154	162	200	0	98	15	15,04
σ , МПа	96,25	105	92,5	108,75	153,13*	82,5	76,25	96,25	101,25	125				
P, кН	174	144	185	178	196	166	215	126	256	176	0,5	108	17	15,42
σ , МПа	108,75	90	115,63	111,25	122,5	103,75	134,38	78,75	160*	110				
P, кН	222	180	196	156	220	155	160	198	240	152	1	117	18	15,74
σ , МПа	138,75	112,5	122,5	97,5	137,5	96,88	100	123,75	150	95				
P, кН	208	218	184	195	110	210	195	184	184	170	2	121	11	8,72
σ , МПа	130	136,25	115	121,88	68,75*	131,25	121,88	115	115	106,25				
P, кН	200	210	198	200	185	190	210	260	188	194	4	123	7	5,97
σ , МПа	125	131,25	123,75	125	115,63	118,75	131,25	162,5*	117,5	121,25				

Условные обозначения: P – предельная нагрузка, кН; σ – предел прочности, МПа; t – время после взрыва, час; $\langle \sigma \rangle$ – среднее значение предела прочности, МПа; $\Delta \sigma$ – абсолютная полная погрешность предела прочности, МПа; δ – относительная полная погрешность предела прочности, %; * – промах. *Примечание.* Средние значения предела прочности определялись без учета промахов.

Следует подчеркнуть, что эффект разупрочнения в максимальной степени проявляется непосредственно после взрыва и в дальнейшем, с течением времени, вследствие постепенной релаксации образовавшихся дефектов, прочность частично восстанавливается [4]. Это подтверждает положение, что продукты детонации под очень высоким начальным давлением, проникая в микротрещины, действуют там подобно клину и способствуют их развитию. При снижении давления в зарядной камере большинство микротрещин постепенно смыкаются, заземляя в своих полостях часть продуктов детонации, препятствующих дальнейшему их закрытию и полному восстановлению прочности породы.

Данные табл. 3 позволили вывести зависимость изменения во времени среднего значения предела прочности лабрадорита с достоверностью $R^2 = 0,9844$.

$$\langle \sigma \rangle = 11,821Ln(t) + 97,203. \quad (1)$$

В четвертой серии экспериментов на моделях 40x40x80 мм исследовали влияние поверхностно-активных веществ в зоне разрушения горных пород на интенсивность их дробления при воздействии импульсных нагрузок, создаваемых взрывом заряда ВВ. При этом необходимо исключить влияние изменения других факторов на процессы дезинтеграции.

В ходе проведения экспериментов в шпуры заливали растворы, содержащие поверхностно-активные вещества в различных концентрациях.

Эти растворы находились в шпурах в течение одного часа для обеспечения их попадания (хотя бы частичного) в микротрещины, имеющиеся в породе.

Затем раствор выливали из шпуров и помещали в них заряды тэна массой 30 мг, которые инициировали микродетонаторами.

Условия передачи энергии ударной волны и энергии взрыва в разрушаемую породу были идентичны условиям третьей серии экспериментов, но, в отличие от них, взрыв заряда тэна массой 30 мг при попадании ПАВ разрушал модели на 10–12 частей без образования мелких фракций.

В последующих экспериментах изменяли также и условия передачи энергии от заряда ВВ к разрушаемой породе, для чего взрывы осуществляли в шпурах, заполненных раствором ПАВ, что существенно изменяло условия передачи энергии в разрушаемую часть породы и значительно повлияло на интенсивность дробления моделей даже при заметном уменьшении массы заряда (табл. 4).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что вследствие уменьшения поверхностной энергии на контактах минеральных образований под действием ПАВ существенно снижается прочность горных пород.

Это связано с тем, что поверхностное натяжение ПАВ в трещинах является адгезионным процессом, т.е. происходит взаимодействие молекул поверхностно-активного вещества с поверхностью породы в трещине за счет сил Ван-дер-Ваальса, водородных связей, электростатических сил.

Главной движущей силой этого процесса, по нашему мнению, является снижение статического модуля упругости горной породы за счет действия сил поверхностного натяжения ПАВ и увеличения динамического модуля упругости, результатом чего явля-

ется изменение пластичности горной породы, а это, в свою очередь, облегчает ее дробление и улучшает качество подготовки горной массы.

Таблица 4

Интенсивность дробления моделей из горных пород при наличии в зоне разрушения ПАВ и изменении условий передачи энергии взрыва к разрушаемой среде через водный раствор

№ п/п	Масса заряда тэна, мг	Интенсивность дробления
1	30	Множество мелких осколков
2	20	Большое количество осколков
3	10	Модель разрушилась на 10 частей
4	6	Модель разрушилась на 6 частей

При взрывной отбойке обводненных трещиноватых массивов сложно дать однозначный ответ на вопрос о степени влияния параметров среды (жидкого заполнителя) между зарядом и стенкой зарядной полости на интенсивность дробления горной массы. Однако, в зависимости от интенсивности силового поля на поверхности породы и под действием различных внешних условий могут образовываться адсорбционные слои, толщиной в одну молекулу (мономолекулярная адсорбция) или несколько молекул – полимолекулярная адсорбция.

При заполнении трещин водой или раствором в воде ПАВ определенной концентрации последний накапливается в поверхностном слое породы. При этом на поверхности концентрируется то вещество, которое обеспечивает наименьшее поверхностное натяжение, возможное в данных условиях. Следует отметить, что в условиях взрывного разрушения обводненных пород частицы химических составляющих породы могут растворяться в минимальных количествах воды или водного раствора ПАВ с установлением концентрационного равновесия (с учетом произведения растворимости). Разница концентраций в поверхностном слое и объеме раствора в трещинах приводит к возникновению сил осмотического давления и процесса диффузии, который стремится выровнять концентрацию по всему объему. Это приводит, в свою очередь, к изменению прочностных свойств поверхности горной породы в трещинах.

В данном случае нельзя вести речь о том, что выравнивание концентраций ПАВ по всему объему трещины приведет к одинаковому изменению прочностных свойств поверхности горной породы в этих трещинах, поскольку в данном случае, по нашему мнению, имеет место механико-диффузионная адгезия – одновременно происходят два процесса:

а) с одной стороны, затекание ПАВ в поры и трещины поверхности твердого тела, которое затвердевает, обеспечивая механическое сцепление с горной породой;

б) с другой стороны, наблюдается взаимное проникновение молекул и атомов в поверхностные слои взаимодействующих фаз. Процесс диффузии приводит как бы к размыванию границы раздела фаз, взаимному их растворению в местах контакта, за счет чего и облегчается дробление горной породы взрывом.

В обоих случаях (а и б) наблюдается различие в энергиях поверхностного натяжения, что, однако, не создает одинаковых условий для изменения прочностных свойств.

Поэтому, в общем случае уменьшение поверхностной энергии будет уравновешено противодействием осмотического давления и в системе наступает динамическое равновесие, характеризующееся определенной разницей концентраций между поверхностным слоем и объемом раствора.

В упругом приближении можно определить изменение удельной поверхностной энергии, которая в первом приближении равна удельной энергии разрушения горной породы

$$e_n = \frac{\sigma_0^2 - \kappa_p^2 \sigma_0^2}{2E} = \frac{\sigma_0^2 (1 - \kappa_p^2)}{2E}, \quad (2)$$

где e_n – потеря удельной поверхностной энергии в результате воздействия на породу ПАВ, МДж/м³; σ_0 – прочность эталонного образца, МПа; κ_p – коэффициент разупрочнения породы под действием ПАВ ($\kappa_p = \sigma_p / \sigma_0$); σ_p – предел прочности породы при статическом одноосном сжатии после воздействия ПАВ, МПа; E – модуль продольной упругости породы, МПа.

Выводы. В процессе исследований установлено влияние среды между зарядом ВВ и стенкой шпура на эффективность передачи энергии взрывного воздействия и интенсивность дробления горной породы. При заполнении шпура водой или раствором солей в результате взрывного воздействия происходит разрушение породы на множество мелких осколков, что свидетельствует о более высокой эффективности передачи энергии взрыва в разрушаемую часть массива. Это справедливо, поскольку взрыв заряда ВВ происходит в зарядной полости, расположенной в обводненном монолитном малотрещиноватом массиве, где минимизированы потери энергии, связанные с движением жидкости в трещинах и пустотах разрушаемого массива.

При взрывной отбойке трещиноватых обводненных массивов часть энергии взрыва расходуется на изменение кинетической энергии движения жидкости в пустотах и трещинах массива, что зависит от степени обводненности и трещиноватости массива.

Список литературы / References

1. Сынбулатов В.В. Направленное изменение деформационных характеристик горных пород поверхностно-активными веществами / Сынбулатов В.В. // Материалы Уральской горнопромышленной декады 4–14 апреля 2005 г. – Екатеринбург: УНУ, 2005. – С. 19–20.

Synbulatov, V.V. (2005), “Directional change of the deformation characteristics of rocks with the surface-active substances”. *Proc. of the Ural mining decade, April 4–14, 2005, Yekaterinburg*, pp. 19–20.

2. Латышев О.Г. Влияние трещиноватости горных пород на их деформационные характеристики / О.Г. Латышев, С.С. Иванов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 1992. – № 3. – С. 23–27.

Latyshev, O.G., Ivanov, S.S. (1992), “The influence of rock fracturing on its deformation characteristics”. *Iz-*

vestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyi zhurnal. no. 3, pp. 23–27.

3. Сынбулатов В.В. Кинетика насыщения горных пород активными растворами / Сынбулатов В.В. // Материалы Уральской горнопромышленной декады 3–13 апреля 2006 г. – Екатеринбург, 2006. – С. 19–20.

Synbulatov, V.V. (2006), “Kinetics of saturation of the rocks with the active substances”. *Proc. of the Ural mining decade, April 3–13, 2006, Yekaterinburg*, pp. 19–20.

4. Долударева Я.С. Обоснование рациональных параметров и конструкций шпуровых зарядов для снижения разупрочнения горных пород при направленном расколе: автореф. диссерт. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.15.09 „Геотехническая и горная механика“ / Долударева Яна Станиславовна. – Кременчуг, 2010. – 24 с.

Doludareva, Ya.S. (2010), “Foundation of rational parameters and constructions of blast-hole charges for reducing of the softening of rocks by directional split”, Abstract of Cand. Sci. (Tech.), *Geotekhnicheskaya i gornaya mekhanika*, published by M. Ostrohradskyi Kremenichug National University, Kremenichug, Ukraine.

Мета. Оцінка впливу поверхнево-активних речовин (ПАР) у зоні руйнування гірських порід на інтенсивність їх дроблення при дії імпульсних навантажень.

Методи. Вибухове неруйнівне імпульсне навантаження зразків лабрадориту з їх наступним одноосьовим стисканням.

Результати. Надходження поверхнево-активної речовини до мікротріщин в зоні руйнування знизило межу міцності породи при статичних навантаженнях у середньому на 23–25%. Отримані результати свідчать про те, що внаслідок зменшення поверхневої енергії на контактах мінеральних утворень під дією ПАР суттєво знижується міцність гірських порід. У процесі досліджень встановлено вплив середовища між зарядом вибухових речовин (ВР) і стінкою шпура на ефективність передачі енергії вибухового впливу й інтенсивність дроблення гірської породи. При заповненні шпура водою або розчином ПАР у результаті вибухової дії відбувається руйнування породи на безліч дрібних уламків, що свідчить про більш високу ефективність передачі енергії вибуху в частину масиву, що руйнується. Під час вибухової відбивки тріщинуватих обводнених масивів частина енергії вибуху витрачається на зміну кінетичної енергії руху рідини в пустотах і тріщинах масиву, що залежить від ступеня його обводненості та тріщинуватості.

Наукова новизна. Обґрунтовано, що поверхневий натяг розчинів ПАР у тріщинах є адгезійно-адсорбційним процесом, тобто відбувається взаємодія молекул поверхнево-активної речовини з поверхнею породи в тріщині за рахунок сил Ван-дер-Ваальса, водневих зв'язків, електростатичних сил. Головною руйнівною силою цього процесу є зниження статичного модуля пружності гірської породи за рахунок дії сил поверхневого натягу ПАР і збільшення динамічного модуля пружності, результатом чого є зміна пластичності гірської породи, а це, у свою чергу, полегшує її дроблення та поліпшує якість підготовки гірської маси. Встановлено, що неруйнівний вибуховий вплив

призводить до збільшення щільності дефектів кристалічної решітки та зниження міцності породи.

Практична значимість. Отримані результати дозволять під час застосування розчинів ПАР різної концентрації регулювати енергію вибухового імпульсу для цілеспрямованого дроблення гірських порід на відкритих розробках корисних копалин.

Ключові слова: міцнісні характеристики, змикання мікротріщин, поверхнево-активні речовини, енергетичні витрати, вибухова дія, поверхнева енергія, зона руйнування, інтенсивність дроблення

Purpose. To estimate the influence of surface active agents in the rock destruction area on the intensity of crushing by the method of impulsive loadings.

Methodology. Application of the explosive non-destructive pulsed stressing to the labradorite samples with subsequent monaxonic compression.

Findings. The surface active agents embedded into the rock microcracks in the area of destruction has reduced ultimate strength of the rock undergoing the static loadings by 23–25% at an average. The obtained results show that the rock strength declines dramatically because of diminishing of the surface energy of contacts between the mineral substances of the rock under the influence of the surface active agents. During the research the influence of environment existing between the charge of explosives and the wall of the blasthole on the efficiency of the explosive energy transmission process and the intensity of the rock crushing was established. When the blasthole is filled with water or a surface active agent solution, the rock crushes into a number of small fragments. This proves the higher efficiency of explosion energy transmission into the rock. During the blasting a certain volume of the explosion energy is spent on the change of kinetic energy of motion of liquid contained in interstices and cracks of the rock massif. The volume depends on the degree of the rock massif watering.

Originality. It was grounded that surface-tension of surface active agent solutions in cracks is caused by adhesion an adsorption process. Thus the interaction of molecules of the surface active agent and the rock surface in a crack is caused by forces of Van der Waals, hydrogen connections, and electrostatic forces. The main role in this process belongs to the decline of the static coefficient of elasticity of the rock caused by the action of forces of surface active agent surface-tension increase and rise of the dynamic modulus of elasticity. This processes result into change of plasticity of rock, and facilitates its crushing and improves quality of the crushed rock mass. We have found out that the non-destructive explosive influence increases the closing of defects of crystalline grate and declines the durability of the rock.

Practical value. The obtained results allow using the surface active agent solutions of different a concentration to regulate the energy of explosive impulse for the purposeful crushing of the rocks in open-cast mines.

Keywords: strength characteristics, closing of micro fractures, surface active agent, energy consumption, explosive impact, surface energy, fracture zone, fracturing rate

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.В. Соболевим. Дата находження рукопису 03.02.12.