

**П.Н. ЩЕРБАКОВ**, канд. техн. наук,

**Л.Ж. ГОРОБЕЦ**, д-р техн. наук

(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет)

## **ВЛИЯНИЕ ПОЛЯ УВЧ НА ДЕЗИНТЕГРАЦИЮ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

*Постановка проблемы.* Важным вопросом в проблеме обоснования рациональной технологии подготовки полезных ископаемых к обогащению является поиск эффективных методов нагружения в процессах их дезинтеграции (дробления, измельчения, диспергирования). К основным параметрам дезинтеграции относятся: средний размер измельченных частиц, массовая доля фракции требуемого размера, удельная поверхность измельченного продукта, степень раскрытия ценных минералов. К энергетическим характеристикам процесса дезинтеграции относят удельный расход энергии на дробление (измельчение) кусков и на получение тонкодисперсных фракций заданного размера – энергоемкость диспергирования.

Энергетические параметры дробления и измельчения, склонность породы к диспергированию, механизм разрушения (хрупкий или пластичный) в процессе дезинтеграции оценивают путем исследования напряженно-деформированного состояния пород на различных стадиях деформирования при одноосном и объемном нагружении модельных образцов пород на специальных установках [1-3].

Метод запредельного деформирования обладает большей информативностью о механизме и эффектах диспергирования, чем метод исследования упругой стадии при одноосном нагружении, и поэтому более предпочтителен при решении задач прогноза технологии измельчения. В частности, характер протекания неустойчивой стадии дает наиболее полное представление об энергетике измельчения сравниваемых пород, поскольку на этой стадии формируется очаг разрушения, содержащий зоны дезинтеграции и диспергирования материала. В этой связи запредельная часть диаграммы  $\sigma$ - $\epsilon$  достоверно характеризует стадию диспергирования, совершаемого на стадии быстрой разгрузки напряжений при саморазрушении, т.е. свободном разрушении нагруженного образца.

Результаты исследований [1, 4] показали полезность применения метода акустической эмиссии в сочетании с запредельным деформированием для прогнозирования эффектов диспергирования породы. Установлено, что повышенная активность акустической эмиссии (АЭ) за пределом прочности нагружаемого образца указывает на высокую степень трещинообразования и значительную степень диспергирования нагружаемого образца.

Установлено, что величина суммарного счета  $N_{\Sigma}$  акустических сигналов за период нагружения образца и соответственно удельной акустической эмиссии  $N_V$  ( $N_V = N_{\Sigma}/V$ ,  $V$  – объем образца) при трехосном сжатии возрастает на 1-2 по-

## Підготовчі процеси збагачення

рядка против варианта одноосного нагружения того же материала. При этом величина  $N_V$  коррелирует с количеством образующихся тонкодисперсных фракций (менее 100 мкм). Акустоэмиссионным признаком интенсивного диспергирования является также увеличение средней  $\dot{N}_{cp}$  или максимальной  $\dot{N}_{макс}$  скорости счета акустических сигналов на запредельной стадии деформирования ( $\dot{N} = N/\tau$  – счет сигналов в единицу времени,  $\tau$  – длительность излучения  $N$  сигналов).

Показано, что в прогнозировании эффектов диспергирования следует учитывать реакцию АЭ на размер нагружаемого объекта, так как с изменением масштаба разрушения изменяется характерный размер структурной неоднородности и, как следствие, удельный счет акустических сигналов.

*Анализ последних достижений.* В Национальном горном университете на уровне изобретения разработан способ дробления кварцсодержащих пород, предусматривающий совместное использование механической нагрузки и электрического поля УВЧ. Этот способ реализован в конструктивном исполнении щековой дробилки [5, 6]. Теоретическими исследованиями [7] установлено, что разность между энергией  $E_{совм}$ , запасенной осциллятором при воздействии на породу механической нагрузки совместно с полем УВЧ, и энергией  $E_{мех}$ , запасенной только при действии механической нагрузки, определяется следующим выражением:

$$E_{совм} - E_{мех} = D(F_1 t + F_2)^2 \cdot (4M)^{-1};$$

причем

$$D = f(\omega, \omega_0, \delta), D > 0; F_1 = \alpha F_0 E_0 k; F_2 = \tau E_0,$$

где  $M$  – приведенная масса, определяемая значениями общих масс положительных и отрицательных ионов;  $t$  – время действия приложенной нагрузки;  $\omega, \omega_0$  – соответственно круговая частота колебаний электромагнитного поля и собственная частота колебаний осциллятора;  $\delta$  – коэффициент трения;  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от ориентации пьезооси кристалла кварца;  $F_0$  – величина прикладываемой механической нагрузки;  $E_0$  – амплитуда колебаний электромагнитного поля;  $k$  – скорость нагружения;  $\tau$  – коэффициент пропорциональности.

Правая часть вышеприведенного выражения, положительна, т.е.

$$E_{совм} - E_{мех} > 0, \text{ откуда } E_{совм} > E_{мех}.$$

Это означает, что все кристаллы кварца при совместном механическом и электрическом нагружении накапливают энергии больше, чем при чисто механической нагрузке в том же режиме нагружения. Причем, доля энергии, обусловленной механической нагрузкой, составляет только часть критической энергии разрушения, и в результате разрушающая механическая нагрузка уменьшается. Кроме того, при = (условие резонанса) амплитуда поглощения достигает максимального значения, что обуславливает максимальные смеще-

## Підготовчі процеси збагачення

ния в кристаллах и усиливает эффекты дробления в процессе дезинтеграции породы. Согласно теории измельчения при нагружении измельчаемых в сверхзвуковых струях частиц ускоряется состояние автоколебательного резонанса в веществе измельчаемого материала, что способствует повышению эффективности диспергирования [1].

В данной работе проведен анализ экспериментальных исследований объемного неравнокомпонентного сжатия полезных ископаемых с обработкой электростатическим полем УВЧ нагружаемых модельных образцов в условиях установки Донецкого физико-технического института. В разработке программ нагружения исследуемых материалов и экспериментах принимала участие с.н.с. Дон ФТИ, к.т.н. Дуброва С.Б.

*Цель данной работы* – исследование совместного действия механической нагрузки и поля УВЧ на эффекты дезинтеграции полезных ископаемых с применением метода акустической эмиссии. Влияние подвода дополнительной энергии в процессе деформирования изучалось с позиции интенсификации разрушения и снижения энергоемкости процесса измельчения.

Эффекты дезинтеграции оценивались путем гранулометрического анализа отдельностей разрушенных образцов с определением их свежесформированной удельной поверхности  $\Delta S/V$  ( $\Delta S$  – прирост площади поверхностей отдельностей и диспергированных частиц). В процессе механических испытаний осуществлялся непрерывный контроль за пределом деформирования и разрушения пород методом акустической эмиссии [1, 4].

*Изложение основного материала.* Испытанию подвергались образцы железных руд Полтавского и Ингулецкого ГОКов, угля и песчаника. Размеры модельных образцов кубической формы – 50×50×50 мм, цилиндрической формы  $D = 40-42$  мм,  $h = 40-45$  мм. Облучение образцов электрическим полем УВЧ проводилось в режиме низкой мощности – 70 Вт и высокой частоты – 40, 68 МГц. Из-за отсутствия возможности установки электродов УВЧ на образце в условиях трехосного сжатия влияние обработки УВЧ-поля было изучено только для режимов одноосного нагружения и простого объемного (с боковым подпором  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ ). Образцы, деформируемые в режиме сложного трехосного нагружения, облучались предварительно. Длительность облучения составила ~20 минут. При проведении эксперимента образец устанавливали на пластины (электроды) контактно, подводили УВЧ-обработку и давали нагрузку на образец одновременно с облучением УВЧ. При этом образец изолировали от пресса специальными пластинами-изоляторами.

В таблице показаны результаты опытов в различных режимах отдельного и совместного нагружения железной руды, песчаника и угля. Следует отметить уменьшение содержания мелких фракций (10-0,1 мм) при использовании УВЧ-обработки всех образцов. При этом содержание наиболее тонких фракций (менее 0,1 мм) уменьшается для железной руды в 1,8-2 раза, тогда как для песчаника это различие незначительно. Для сравнения ниже приводятся оценки эффектов диспергирования по величине общей  $\Delta S$  и удельной  $\Delta S/V$  образованной поверхности при разрушении облученных и необлученных образцов железной руды:

## Підготовчі процеси збагачення

$\Delta S/V = 2355 \dots 4157 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ;  $\beta_{100} = 1,21 \dots 2,34 \%$  (без УВЧ);

$\Delta S/V = 1083 \dots 1192 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ;  $\beta_{100} = 0,4 \dots 0,52 \%$  (с УВЧ).

Величина  $\Delta S$  снижается при УВЧ-обработке для железной руды (ИНГОК) в 26 раз, а  $\Delta S/V$  – в 16 раз за счет уменьшения содержания не только тонкодисперсных частиц (менее 0,1 мм), но и дробленых отдельностей размером от 10 до 0,1 мм. Установлено, что степень влияния УВЧ-поля изменяется в зависимости от глубины залегания породы. Для пород, добытых с глубоких горизонтов, эффект воздействия УВЧ-поля проявляется сильнее.

Диаграммы деформирования образцов  $\sigma(\varepsilon_1)$ , приведенные на рис. 1, иллюстрируют эффекты действия облучения совместно с механической нагрузкой.

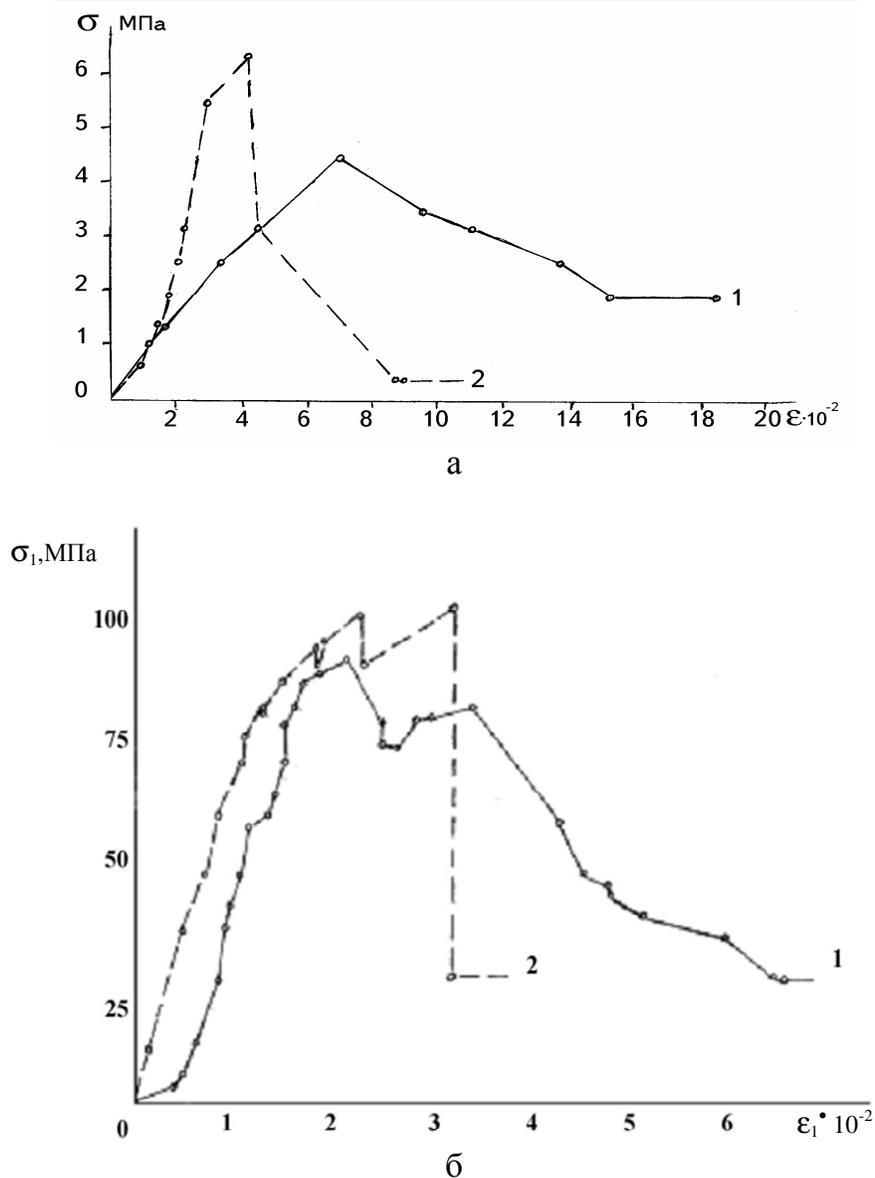


Рис. 1. Диаграммы  $\sigma(\varepsilon)$  деформирования одноосным сжатием образцов угля (а), железной руды (б), облученных (1) и необлученных (2) полем УВЧ

## Підготовчі процеси збагачення

Из рис. 1 видно, что предел прочности железной руды уменьшается в 1,2-1,7 раза в зависимости от типа породы, формы образца, характера нагружения при значительном проявлении пластичности вещества. Предел прочности облученного образца угля также в 1,4 раза снижается по сравнению с необлученным объектом. Для угля зафиксирован рост пластичности как в допредельной области, так и после достижения образцом предела прочности. Следует отметить наблюдаемую склонность необлученного образца к хрупкому разрушению, а облученного образца – к пластичному.

Предварительное облучение образцов, а затем деформирование и разрушение их в режиме объемного сжатия не привело к заметному эффекту дезинтеграции (см. таблицу). Полагаем, что влияние поля УВЧ при одновременном сжатии состоит в усилении пластических свойств материала, что и приводит к уменьшению предела прочности породы. Как следствие, снижается критическая плотность энергии при разрушении и уменьшается эффект диспергирования. Сделанный вывод подтверждается характером трещинообразования, контролируемым методом АЭ в процессе деформирования одноосным сжатием образцов железной руды.

Анализ диаграмм приводит к следующему выводу. Вещество с преимущественно хрупким механизмом разрушения (рис. 1, графики 2) высвобождает накопленную энергию главным образом путем перепада напряжений на стадии диспергирования (быстрой разгрузки напряжений), тогда как в случае преобладающего пластического механизма разрушения (рис. 1, графики 1) релаксация энергии происходит путем значительных деформаций на стадии, предваряющей устойчивое состояние (состояние остаточной прочности).

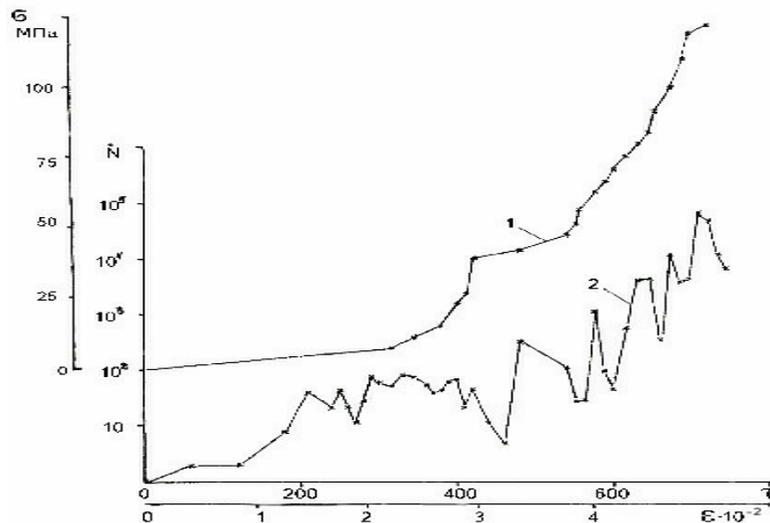


Рис. 2. Кинетика роста напряжений (1) и акустического излучения (2) в процессе одноосного сжатия железной руды без обработки полем УВЧ:

$$1 - \sigma(\tau); 2 - \dot{N}(\tau);$$

$\tau$  – длительность нагружения, с;  $\varepsilon$  – текущая деформация, доли ед.;

$\sigma$  – напряжение, МПа;  $\dot{N}$  – активность АЭ, с<sup>-1</sup>

## Підготовчі процеси збагачення

На рис. 2 и 3 иллюстрируется напряженно-деформированное состояние и характер акустического излучения необлученного и облученного образцов железной руды.

На рис. 2 прослеживается изменение активности  $\dot{N}$  АЭ и напряжений  $\sigma$  в нагружаемом образце железной руды с ростом текущей деформации  $\varepsilon$ . Видно, что с повышением уровня напряженно-деформированного состояния необлученного образца усиливается акустическое излучение, сопутствующее актам раскрытия и развития трещин.

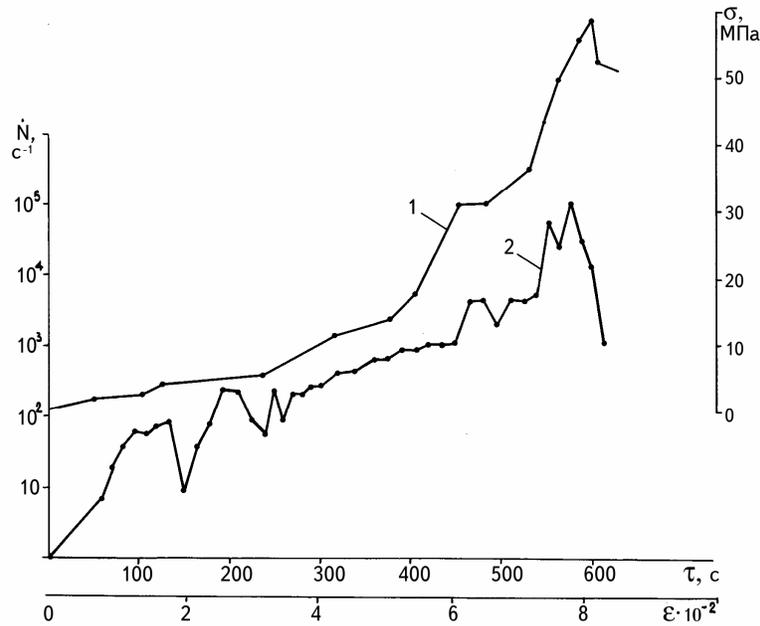


Рис. 3. Кинетика напряженно-деформированного состояния и акустического излучения образца железной руды при одноосном сжатии в поле УВЧ:

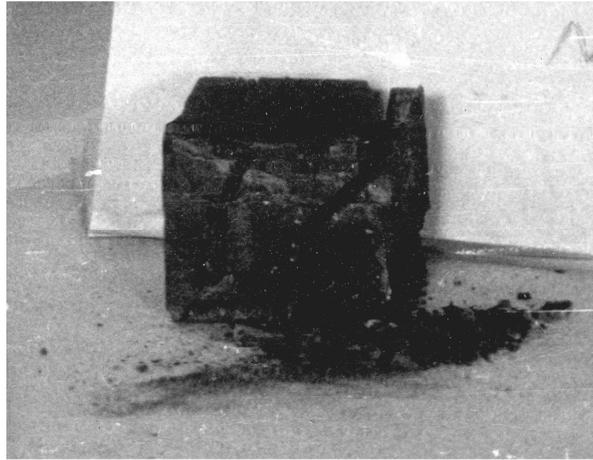
$$1 - \sigma(\tau); 2 - \dot{N}(\tau)$$

Из рис. 3 видно, что обработка полем УВЧ в процессе нагружения склоняет разрушение к сдвиговому механизму, при котором плавно нарастает число АС, без резких всплесков АЭ, характеризующих хрупкое разрушение. Предел прочности руды, облученной УВЧ, заметно снижается, а предельная деформация увеличивается.

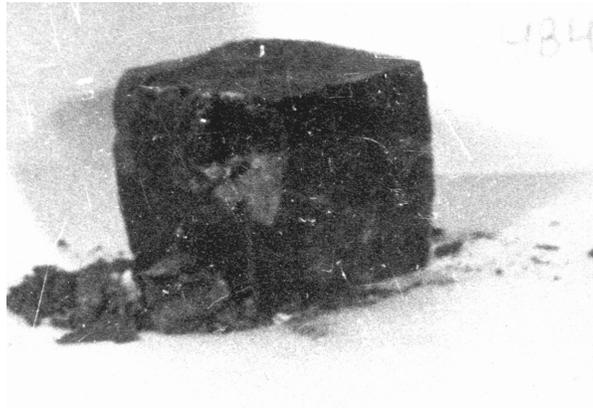
Усиление пластичности разрушения образцов, облученных УВЧ-полем подтверждается также рисунками 4 и 5. Например, необлученный кубический образец угля разрушился по плоскостям, параллельным действию максимально сжимающего напряжения  $\sigma_1$ . Под действием нормальных напряжений произошло увеличение объема и разрушение отрывом за счет разрыхления и высыпания мелкодисперсных фракций. Аналогичный образец, облученный полем УВЧ, оказался преимущественно под действием касательных напряжений с образованием плоскостей скольжения. Плоскость разрушения не параллельна ни одной из граней образца и более всего соответствует виду разрушения сдви-

## Підготовчі процеси збагачення

гом. Увеличение объема весьма незначительно, равно как и выход мелкодисперсных фракций. Аналогичная картина наблюдается также для образцов железной руды на рис. 5.



а



б

Рис. 4. Характер разрушения необлученного (а) и облученного (б) полем УВЧ образцов угля



а

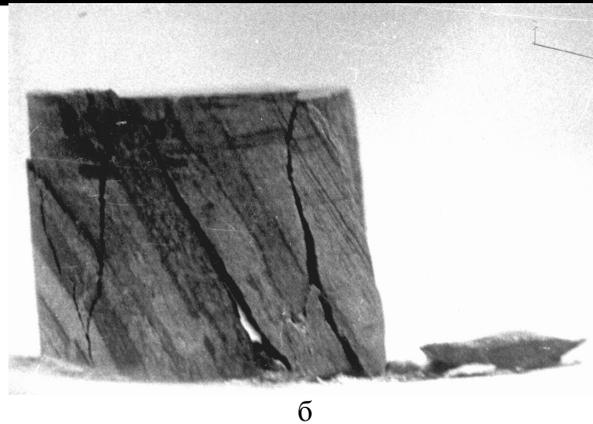


Рис. 5. Характер разрушения необлученного (а) и облученного (б) полем УВЧ образцов железной руды

Полезной информацией для практики горного дела обладают параметры  $\gamma$  и  $\eta$ , характеризующие природные энергетические свойства материалов, их способность к образованию новой поверхности и эффективность проявления этого свойства при разрушении. Наибольшее значение  $\gamma$  у песчаника НВО ( $\gamma = 205 \text{ Дж/м}^2$ ) и наименьшее – у железной руды ( $\gamma = 0,5 \text{ Дж/м}^2$ ). Возможно, что столь малые величины  $\gamma$  у железной руды и угля ( $\gamma = 1,1 \text{ Дж/м}^2$ ) свидетельствуют о легкости образования поверхности на стадии саморазрушения и являются прогностическим признаком высокой скорости разрушения и диспергирования, т.е. динамичности разрушения.

Экспериментально установленная величина к.п.д. диспергирования  $\eta = (0,02...7,8) \cdot 10^{-2}$  хорошо согласуется с теоретическими представлениями о механизме измельчения, согласно которым максимальная величина  $\eta$  должна быть в интервале  $10^{-2}...10^{-3}$ . Опыты показали, что содержание в разрушенном продукте тонкодисперсных фракций составляет величину одного порядка с к.п.д. диспергирования –  $\beta_{100} = 0,1...2,3\%$ .

Результаты экспериментальных исследований позволяют сделать следующие выводы.

1. Показателями энергоемкости дезинтеграции полезных ископаемых при могут служить активность  $\dot{N}$  акустического излучения в процессе объемного нагружения модельных образцов и акустоэмиссионная эффективность  $N_e = \dot{N} / \dot{\epsilon}$  их разрушения ( $\dot{\epsilon}$  - скорость динамической деформации);

2. Применение УВЧ-поля при дроблении полезных ископаемых оказывает существенное влияние на механизм их разрушения и величину критической нагрузки.

3. Использование резонансных частот УВЧ в рациональных режимах нагружения приводит к снижению энергоемкости разрушения и удельных затрат энергии на дробление и измельчение.

4. Целесообразно в дальнейшем развить методику экспериментальных исследований совместного действия поля УВЧ и механической нагрузки для воз-

можности их постановки в производственных условиях на образцах пород произвольной формы.

**Список литературы**

1. Горобец Л.Ж. Развитие научных основ измельчения твердых полезных ископаемых: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Д.: НГУ, 2004. – 35 с.
2. А.с. 394892 СССР. Установка для испытания призматических образцов в условиях объемного сжатия: / А.Д. Алексеев, Е.Н. Осыка, А.Л. Тодосейчук (СССР); опубл. 23.11.73, Бюл. №34. – 2 с.
3. Алексеев А.Д., Недодаев Н.В. Предельное состояние горных пород. – К.: Наук. думка, 1982. – 197 с.
4. Исследование акустоэмиссионных свойств природных материалов в режиме высоких давлений / Л.Ж. Горобец, В.Н. Бовенко, С.Б. Дуброва и др. // Физика и техника высоких давлений. – 1995. – №3. – С. 65-73.
5. А.с. 1659100, МКИ В 02 С 19/18. Способ дробления кварцсодержащих пород / Р.С. Крысин, П.Н. Щербаков (СССР). – 4667933-33/016004; заяв. 27.01.89; опубл. 30.06.91, Бюл. №24. – 2 с.
6. Дробарка: пат. 49876 Україна: В 02 С 1/2; В 02 С 19/18. / Р.С. Крисін, П.М. Щербаков, В.О. Арсентьев; – №93006556; заявл. 09.04.93; опубл. 25.12.97, Бюл. №6. – 3 с.
7. Теоретические основы комбинированного разрушения кварцсодержащих пород и руд/ Р.С. Крысин, В.О. Арсентьев, П.М. Щербаков, С.И. Самайда // Известия ВУЗов. Горный журнал. – 1992.– № 4. – С. 1-4.

© Щербаков П.М., Горобец Л.Ж., 2012

*Надійшла до редколегії 12.02.2012 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим*