

УДК 622.236.9

**О.А. Азимов****ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМОВ  
ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО  
РАЗУПРОЧНЕНИЯ КВАРЦА \***

Приведены результаты лабораторных испытаний для выявления влияния параметров (частоты электромагнитного поля, напряженности электромагнитного поля и количества импульсов) импульсной электромагнитной обработки (ИЭМО) на степень разупрочнения кварца. По результатам линейного регрессионного анализа полученных лабораторных данных были построены графики зависимости влияния амплитудно-частотных характеристик ИЭМО на относительный прирост выхода класса -0,5 мм при ударном измельчении кварца. Рассчитаны значения коэффициента "m" из уравнения Розина-Раммлера, от величины которого зависит однородность гранулометрического состава материала при измельчении.

*Ключевые слова:* рудоподготовка, импульсная электромагнитная обработка, разупрочнение, кварц.

Семинар № 4

**O.A. Azimov**  
**EXPERIMENTAL GROUNDING OF  
THE REGIMES OF IMPULSE ELEC-  
TROMAGNETIC SOFTENING OF  
QUARTZ**

*The results of laboratory tests for defining the influence of impulse parameters of electromagnetic processing (such as frequency, intensity and impulse number of electromagnetic field) on softening of quartz are given. Linear regression analysis has been conducted. On the basis of these results the function graphs describing impact grinding of quartz were constructed. The graphs show the dependence of the increment of 0.5 mm fraction on amplitude-frequency characteristics of impulse electromagnetic processing. The consistency of grain composition during grinding depends on the value of "t" ratio. The values of "t" ratio from Rozin-Rammler equation are reviewed.*

*Key words:* ore preparation, impulse electromagnetic processing, softening, quartz.

**П**роцесс рудоподготовки в технологии обогащения различных руд, а точнее, процесс измельчения руды в мельницах, является наиболее энергоемким. Одним из перспективных направлений по снижению энергоемкости измельчения руды является ее предварительная обработка импульсным электромагнитным полем [1, 2].

Технология импульсной электромагнитной обработки (ИЭМО) руд осуществляется непосредственно перед помолом в мельницах путем пропускания руды через диэлектрический трубопровод определенной длины, на котором размещена система электромагнитных катушек, генерирующая в непрерывном автоматическом режиме импульсы электромагнитного поля с заданной частотой следования [5].

Энергозатраты на ИЭМО не превышают 0,1–0,4 кВт час на одну тонну руды [1, 3]. Небольшая энергоемкость процесса позволяет при ИЭМО на стадии рудоподготовки снизить удельную энергоемкость помола в

\*Работа была выполнена на базе Некоммерческого партнерства Научно-образовательного центра «Инновационные горные технологии» (ЦИГТ)

1,3–2,2 раза, что составляет в среднем 8–15 кВт час на одну тонну руды.

Область эффективного применения ИЭМО во многом обусловлена минеральным составом руды. Желательно, чтобы минеральный состав соответствовал хотя бы одному из нижеприведенных требований:

- минералы, входящие в состав руды, обладают резко отличающимися магнитоэлектрическими и механическими свойствами;

- один или несколько минералов обладают магнитными свойствами;

- один или несколько минералов обладают электропроводностью;

- один или несколько минералов являются пьезоэлектриками, либо сильными электрострикторами.

Пьезоэлектричество - явление возникновения поляризации диэлектрика под действием механических напряжений (прямой пьезоэлектрический эффект) и возникновения механических деформаций под действием электрического поля (обратный пьезоэлектрический эффект). Прямой и обратный пьезоэлектрический эффекты наблюдаются в одних и тех же кристаллах-пьезоэлектриках (кварц, турмалин и др.) [4].

Кварц является одним из самых распространенных минералов в составе различных руд. Поэтому целесообразно определить область оптимальных амплитудно-частотных параметров поля ИЭМО для разупрочнения кварца.

В связи с этим были поставлены следующие задачи:

**Задача 1.** Выявить влияние параметров ИЭМО (частоты электромагнитного поля, напряженности электромагнитного поля и количества импульсов) на степень разупрочнения кварца.

Испытания проводились в следующей последовательности:

- руда крупностью -10+7 взвешивалась по 80 гр. для каждого испытания;

- экспериментальные пробы подвергались ИЭМО при разных параметрах;

- для измельчения ударным способом на копре все пробы (экспериментальные и контрольные) делились по 20 граммовым навескам;

- после измельчения на копре пробы просеивались в течение 5 мин. вручную. Были использованы сита с размером ячеек 5, 2, 1 и 0,5 мм. После отсева каждая фракция экспериментальных и контрольных проб взвешивалась.

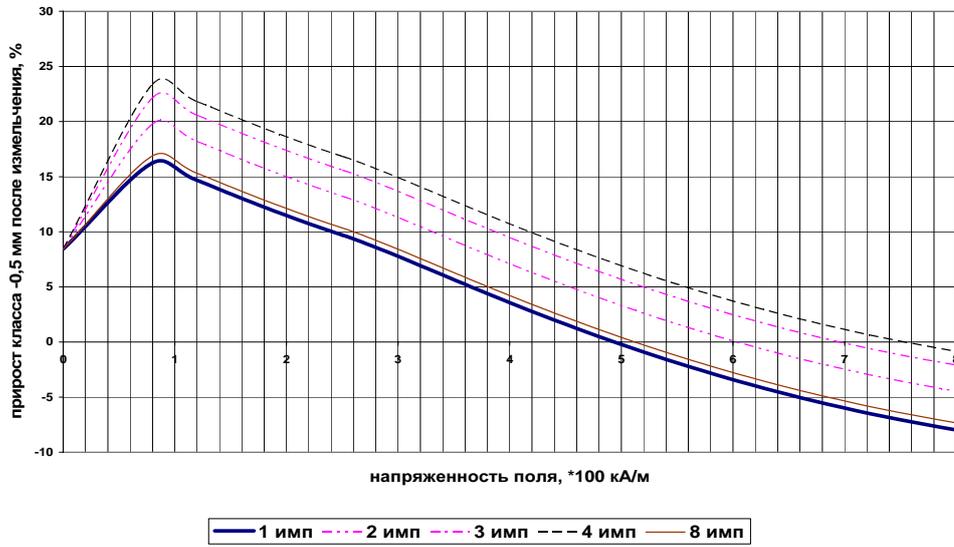
В качестве критерия разупрочнения была принята величина относительного прироста выхода класса -0,5 мм. Величина относительного прироста выхода класса -0,5 мм, характеризующая эффективность соответствующего режима ИЭМО, определялась по формуле:

$$\Delta\Theta = \frac{\Theta_{0,5}^{МНО} - \Theta_{0,5}^{Контр}}{\Theta_{0,5}^{Контр}} \cdot 100\%$$

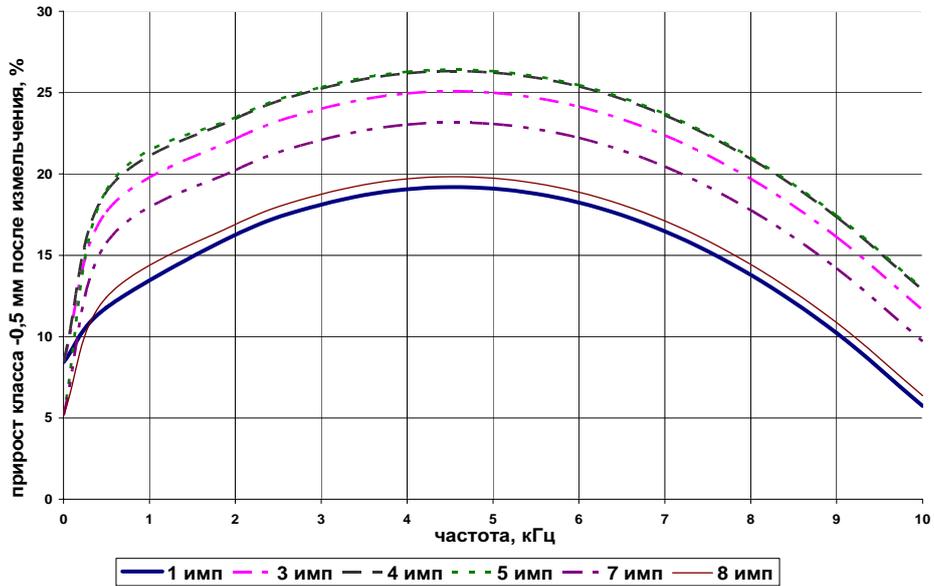
где  $\Delta\Theta$  - прирост выхода класса -0,5 мм, %;  $\Theta_{0,5}^{МНО}$  - содержание класса -0,5 мм в экспериментальной пробе, %;  $\Theta_{0,5}^{Контр}$  - содержание класса -0,5 мм в контрольной пробе, %.

По результатам линейного регрессионного анализа полученных данных были построены графики зависимости влияния амплитудно-частотных характеристик ИЭМО на относительный прирост выхода класса -0,5 мм при ударном измельчении кварца (рис. 1 и рис. 2).

Для распределения руды по классам на разгрузке мельницы используем уравнение Розина-Раммлера, которое наиболее широко применяется в практике и отражает все особенности процесса измельчения:



**Рис. 1. Влияние напряженности импульсного электромагнитного поля на разупрочнение кварца**



**Рис. 2. Влияние частоты импульсного электромагнитного поля на разупрочнение кварца**

Таблица 1

**Относительный прирост выхода класса -0,5 мм после разрушения на копре**

№	Режим ИЭМО или контроль	Выход класса -0,5 мм, %	Относительный прирост за счет ИЭМО (по классу - 0,5 мм), %
1	Контроль	11,48	-
2	НЧ-3имп (H=2,5*10 <sup>5</sup> А/м, 2кГц)	12,86	12,02
3	НЧ-10имп (H=2,5*10 <sup>5</sup> А/м, 2кГц)	11,41	-0,61
4	НЧ-3имп (H=2,5*10 <sup>5</sup> А/м, 8кГц)	14,02	22,13
5	НЧ-5имп (H=2,5*10 <sup>5</sup> А/м, 8кГц)	14,52	26,48
6	НЧ-5имп (H=2,5*10 <sup>6</sup> А/м, 8кГц)	8,95	-22,04
7	НЧ-3имп (H=2,5*10 <sup>6</sup> А/м, 8кГц)	8,5	-25,96
8	НЧ-5имп (H=8*10 <sup>5</sup> А/м, 8кГц)	9,53	-16,99
9	НЧ-1имп (H=1,2*10 <sup>5</sup> А/м, 2 кГц)	12,77	11,2
10	НЧ-3имп (H=1,2*10 <sup>5</sup> А/м, 2кГц)	13,23	15,24
11	НЧ-5имп (H=1,2*10 <sup>5</sup> А/м, 2кГц)	14,65	27,61
12	НЧ-1имп (H=2,5*10 <sup>5</sup> А/м, 2кГц)	15,06	31,18
13	НЧ-1имп (H=1,2*10 <sup>5</sup> А/м, 6 кГц)	12,63	10,02
14	НЧ-4имп (H=1,2*10 <sup>5</sup> А/м, 6 кГц)	14,47	26,05
15	НЧ-1имп (H=0,8*10 <sup>5</sup> А/м, 6 кГц)	14,33	24,83
16	НЧ-3имп (H=0,8*10 <sup>5</sup> А/м, 6 кГц)	12,05	4,97

$$R = 100 e^{-ka^m} \quad (1)$$

где,  $R$  – полный остаток на сите с размером  $a$ , %;  $a$  – размер отверстия сита или соответствующий класс крупности, мм;  $k$ ,  $m$  – коэффициенты, зависящие от свойств материала и размерности  $a$ . Показатель степени  $m$  характеризует рассеяние частиц по крупности; чем больше  $m$ , тем выше однородность материала. [7]

**Задача 2.** Исследовать влияние ИЭМО перед разрушением кварца ударным способом на изменение коэффициента  $m$ . Для решения поставленной задачи были проанализированы результаты лабораторных испытаний, полученные при разрушении экспериментальных (обработанных импульсным электромагнитным полем) и контрольных проб кварца ударным способом на копре (табл. 2). Для определения коэффициента  $m$  необходимо рассматривать выход фракции двух классов. В качестве критерия

были использованы результаты по выходам фракции классов +5 мм ( $R_1$ ) и +0,5 мм ( $R_2$ ). При этом,  $d_1=5$ ;  $d_2=0,5$ .

$$R_1 = e^{-kd_1^m}; R_2 = e^{-kd_2^m};$$

$$\ln R_1 = -kd_1^m; \ln R_2 = -kd_2^m;$$

$$\frac{\ln R_1}{\ln R_2} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^m;$$

$$m \ln \frac{d_1}{d_2} = \ln \left(\frac{\ln R_1}{\ln R_2}\right); m = \frac{\ln \left[\frac{\ln R_1}{\ln R_2}\right]}{\ln \frac{d_1}{d_2}}$$

Для оценки изменения коэффициента “ $m$ ” от режима ИЭМО была построена гистограмма (рис. 3).

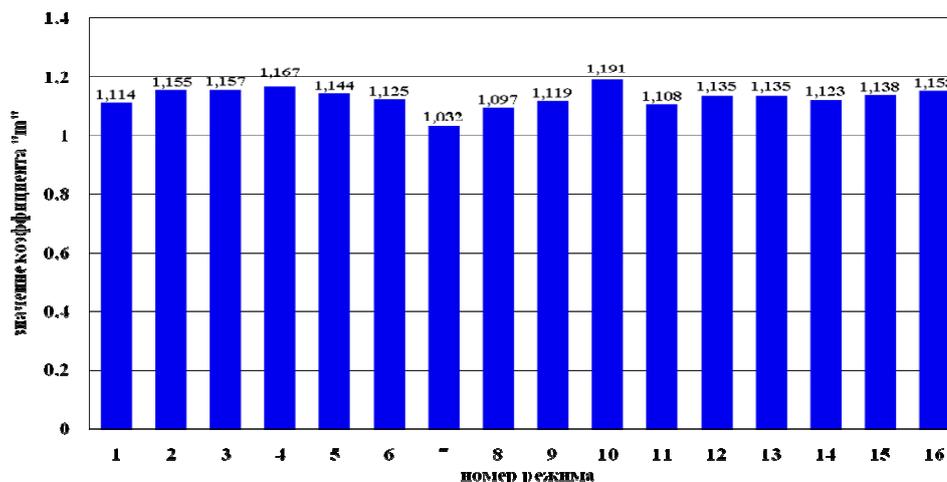
Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод:

- при следующих параметрах ИЭМО: напряженности электромагнитного поля от  $0,8 \cdot 10^5$  А/м до  $1,2 \cdot 10^5$  А/м, частоте электромагнитного поля от 3 кГц до 6 кГц и количестве импульсов от 3 до 5 можно максимально разупрочнить кварц, что

Таблица 2

**Фракционный состав кварца после разрушения на копре**

№	Режим ИЭМО или контроль	выход по классам, дол.ед.					коэфф. m
		+5мм	-5+2мм	-2+1мм	-1+0,5мм	-0,5мм	
1	Контрольная	0,204	0,455	0,148	0,078	0,115	1,114
2	НЧ-3имп (H=2,5*10 <sup>5</sup> А/м, 2кГц)	0,139	0,471	0,170	0,091	0,129	1,155
3	НЧ-10имп (H=2,5*10 <sup>5</sup> А/м, 2кГц)	0,176	0,489	0,138	0,083	0,114	1,157
4	НЧ-3имп (H=2,5*10 <sup>5</sup> А/м, 8кГц)	0,109	0,468	0,185	0,098	0,140	1,167
5	НЧ-5имп (H=2,5*10 <sup>5</sup> А/м, 8кГц)	0,113	0,456	0,190	0,096	0,145	1,144
6	НЧ-5имп (H=2,5*10 <sup>6</sup> А/м, 8кГц)	0,284	0,412	0,140	0,074	0,090	1,125
7	НЧ-3имп (H=2,5*10 <sup>6</sup> А/м, 8кГц)	0,384	0,342	0,123	0,066	0,085	1,032
8	НЧ-5имп (H=8*10 <sup>5</sup> А/м, 8кГц)	0,287	0,444	0,121	0,053	0,095	1,097
9	НЧ-1имп (H=1,2*10 <sup>5</sup> А/м, 2 кГц)	0,165	0,441	0,178	0,088	0,128	1,119
10	НЧ-3имп (H=1,2*10 <sup>5</sup> А/м, 2кГц)	0,111	0,482	0,183	0,092	0,132	1,191
11	НЧ-5имп (H=1,2*10 <sup>5</sup> А/м, 2кГц)	0,132	0,430	0,190	0,102	0,146	1,108
12	НЧ-1имп (H=2,5*10 <sup>5</sup> А/м, 2кГц)	0,107	0,443	0,199	0,100	0,151	1,135
13	НЧ-1имп (H=1,2*10 <sup>5</sup> А/м, 6 кГц)	0,159	0,448	0,177	0,090	0,126	1,135
14	НЧ-4имп (H=1,2*10 <sup>5</sup> А/м, 6 кГц)	0,125	0,449	0,186	0,095	0,145	1,123
15	НЧ-1имп (H=0,8*10 <sup>5</sup> А/м, 6 кГц)	0,120	0,442	0,195	0,100	0,143	1,138
16	НЧ-3имп (H=0,8*10 <sup>5</sup> А/м, 6 кГц)	0,160	0,470	0,167	0,082	0,121	1,153



**Рис. 3. Зависимость коэффициента  $m$  от режима ИЭМО**

позволяет снизить энергозатраты на помол.

- в процессе проведенных лабораторных исследований установлено, что ИЭМО не только разупрочняет обрабатываемый материал, но и из-

меняет распределение материала по классам крупности. Чем больше коэффициент  $m$ , тем выше однородность гранулометрического состава измельчаемого материала, что приводит к уменьшению шламов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гончаров С.А., Ананьев П.П., Дашко С.А., Бельченко Е.Л., Томаев В.К. «Применение электромагнитной обработки минерального сырья с целью создания ресурсосберегающей технологии его измельчения». Москва, Горный журнал, №3, 2002, с. 21-24.
2. Гончаров С.А., Ананьев П.П., Дашко С.А., Мартынов Ю.А., Осташевский А.А. «Использование электромагнитной обработки золотосодержащих руд на этапе измельчения и цианирования». Москва, Горный информационно-аналитический бюллетень, №7, 2004, с. 5-7.
3. Гончаров С.А., Ананьев П.П., Бруев В.П. «Математическое моделирование процесса разупрочнения железистых кварцитов при их магнитно-импульсной обработке

- (МИО)». Москва, Горный информационно-аналитический бюллетень, №10, 2005, с. 5-9.
4. Келп У. Пьезоэлектричество и его практическое применение. Пер.с англ., М., 1949.
5. Гончаров С.А., Ананьев П.П., Иванов В.Ю. Разупрочнение горных пород под действием импульсных электромагнитных полей. Учебное пособие - М., издательство МГТУ, 2006.
6. Пивняк Г.Г., Вайсберг Л.А., Кириченко В.И., Пилов П.И., Кириченко В.В. Измельчение энергетика и технология. – М., изд. Дом «Руды и металлы», 2007.
7. Тангаев И.А. «Энергоемкость процессов добычи и переработки полезных ископаемых» - М.: Недра, 1986 г., 231 с. **ГИАБ**

#### Коротко об авторе

Азимов О.А. – аспирант, e-mail: [cigt@mail.ru](mailto:cigt@mail.ru).  
 Московский государственный горный университет,  
 Moscow State Mining University, Russia.