

УДК 622.02. (075.8)

**МЕТОД ОПТИМАЛЬНОГО РАЗУПРОЧНЕНИЯ И  
ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ КРЕПКИХ РУД И МИНЕРАЛОВ  
THE METHOD OF OPTIMAL SOFTENING AND REDUCTION HARD ORES  
AND MINERALS**

**ТАЖИБАЕВ К.Т., СУЛТАНАЛИЕВА Р.М., АКМАТАЛИЕВА М.С.,**

**ТАЖИБАЕВ Д. К.**

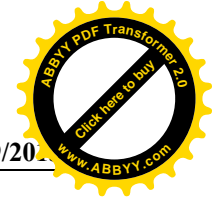
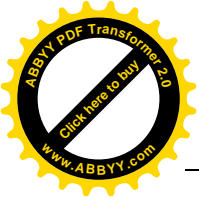
**КГТУ им. И. Раззакова**

**izvestiya@ktu.aknet.kg**

*Предложен метод оптимального разупрочнения и измельчения крепких руд и минералов, позволяющий обеспечить экономию энергии при измельчении, уменьшение расхода металла за счет уменьшения износа металлических частей мельниц, увеличение выхода полезного компонента (извлекаемого металла) за счет улучшения раскрываемости минеральных зерен путем применения оптимальной длительности воздействия на руду СВЧ волн.*

**Введение.** В процессе рудоподготовки механическое измельчение руды до размера частиц порядка десятков микрометров, необходимое для дальнейшей флотации, является наиболее энергоемким и дорогостоящим процессом в технологической цепи извлечения полезных компонентов (металлов, полезных минералов). При этом КПД процесса механического измельчения составляет всего 1÷2 %, остальные 98 % энергии приложенной для разрушения (образования новой поверхности) руды, рассеивается в виде диссипативных потерь (энергия теплоты, звука, колебаний окружающей среды). Известно, что при мировом объеме переработки руд 41 млрд. т. в год (в РФ около 4 млрд.т.) на измельчение затрачивается порядка 2 млрд. долларов США (в РФ – 6 млрд. рублей). Отсюда ясно, почему в последнее время представляют большой практический интерес разработки новых способов разрушения или разупрочнения руд и минералов, новых энерго-и ресурсосберегающих технологий измельчения руд.

Решение проблемы обогащения крепких полиминеральных руд возможно при применении двух принципиально разных способов разрушения руд и минералов. Первый из них основан только на механическом разрушении, что требует создания специальных измельчителей руд со значительной единичной мощностью. В настоящее время данное направление встречает ряд затруднений: как указано выше, большая часть энергии при механическом измельчении теряется. Второй - до механического разрушения используется предварительное снижение прочности (разупрочнение) пород путем воздействия на руды и минералы тем или иным видом энергии.



В последнее время повышение производительности обогащения, эффективность измельчения связаны с изысканием эффективных методов разупрочнения руд. В связи с этим большое значение приобретают различные способы разупрочнения руд и минералов путем воздействия на них физическими полями.

Из всех известных и в определенной мере изученных видов энергии, с точки зрения способности влиять на физико-механические свойства минералов и руд, наиболее перспективна энергия электромагнитного поля сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона. Преимущества разупрочнения в СВЧ электромагнитных полях - это объемный характер влияния СВЧ энергии на структурное состояние руд.

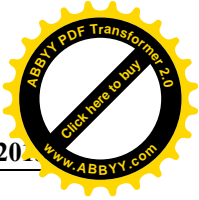
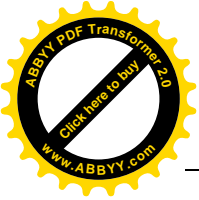
В связи с этим нами проведены экспериментальные исследования энергоемкости измельчения горных пород и руд с целью управления их прочностными свойствами путем воздействия на них сверхвысокочастотными электромагнитными волнами - СВЧ-облучением.

**Метод исследования.** Известно, что при воздействии СВЧ-волнами на руду, содержащую минералы металлов (пирит, никелит, магнетит и т.д.) и минералы пустой породы (кварц, кальцит и т.д.), в первых - происходит поглощение энергии СВЧ-облучения в значительно большей степени, чем во вторых минералах. Поэтому в СВЧ-поле рудные минералы нагреваются, а пустая порода в начале остается холодной. Неравномерное нагревание приводит к появлению термомеханических напряжений и образованию микротрещин, а также формированию остаточных напряжений, которые, в свою очередь, тоже обуславливают изменение прочности.

Известен способ разрушения горных пород путем облучения двумя генераторами СВЧ-волн [1]. По данному способу сначала массив породы облучают волнами меньшей энергетической плотности ( $150-300 \text{ Вт/см}^2$ ) от первого генератора до образования теплового следа, а затем - волнами большей плотности ( $300-5000 \text{ Вт/см}^2$ ) от второго генератора, идущими в перпендикулярном направлении. Первое облучение создает в породе нагретую зону с повышенным значением мнимой составляющей диэлектрической проницаемости.

Для лучей (излучения) второго генератора указанная зона является сильно поглощающей, тогда как не нагретая порода - прозрачной. В результате мощность второго генератора поглощается в основном в зоне пересечения облучений. Резкий нагрев зоны пересечения приводит к тепловому расширению, фазовым превращениям, образованию газовой фазы и т.д. в этой области, что ведет к разрушению породы. Перемещая антенну второго генератора над поверхностью массива вдоль теплового следа, можно создавать канал разрушенной породы или резать ее. Этим способом разрушались кристаллические сланцы, амфиболиты, габбро-диабазы, граниты, песчаники и другие породы с использованием генераторов на частоте 2,4 ГГц. Объем разрушаемой породы в секунду составлял  $180-250 \text{ см}^3$  [1].

В работе [2] приведены результаты проведенных экспериментов по измельчению и ситовому анализу проб железных руд, нагреваемых СВЧ-полем до  $300^\circ\text{C}$  (плотность потока мощности  $3560 \text{ Вт/см}^2$ , время облучения 3 мин), а также нагреваемых в муфельной печи до той же



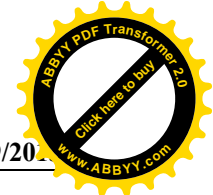
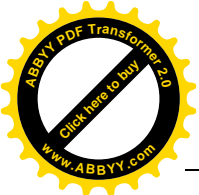
температуры, и проб, неподвергнутых тепловой обработке. Оказалось, что в продукте измельчения руды, нагретой в печи, по сравнению с контрольным (исходным) образцом, выход классов мельче 0,1 мм существенно не изменился, тогда как в нагретой СВЧ-полем пробе выход увеличился. Так, выход класса 0,074 мм увеличился на 6-10%. Крупные классы руды, нагретой в печи, оказались размолоты более эффективно - в них возросло содержание средних фракций. При СВЧ-нагреве до той же температуры, что и в печи, это различие проявляется в большей мере. Аналогичные зависимости были получены и на пробах руды, нагревавшихся до других температур - от 80 до 450°C. Выявленные преимущества СВЧ-нагрева по сравнению с печным связываются с селективностью воздействия СВЧ-поля на минералы и раскрытием зерен по плоскостям спайности. Измельчение руды, обработанной СВЧ-полем в разных режимах, показало, что с увеличением времени воздействия содержание классов мельче 0,16 мм в продукте измельчения закономерно возрастает. При этом для контрольного и обработанного продуктов различие по классу 0,074 мм достигает 25%. Наиболее полное раскрытие для данной руды достигается в классе - 0,05 мм, что подтверждено данными, полученными при изучении под микроскопом. Обработка руды в потоке СВЧ - мощности 35 Вт/см<sup>2</sup> в течение 1-10 мин. позволяет повысить производительность мельницы по крупности 10 - 0,05 мм на 60%. Увеличение потока мощности дает возможность достичь тех же результатов при меньшем времени обработки.

Недостатки указанных способов и методов измельчения руд состоят в том, что в них не предусмотрено точное определение оптимальной продолжительности воздействия на руду СВЧ-волн. Известно, что длительные воздействия СВЧ-волн могут привести, наоборот, к увеличению прочности (к упрочнению), а недостаточно продолжительное воздействие волн – к несущественным структурным изменениям, в результате чего не обеспечивается разупрочнение и уменьшение энергоемкости измельчения руд. Действительно, в работах исследователей из РФ [3,4] убедительно доказана необходимость подбора своего оптимального режима СВЧ – обработки для каждого конкретного вида горной породы, если мы имеем целью не только получить необходимые изменения ее параметров при минимуме энергозатрат, но и улучшить дальнейшую переработку. Случайно выбранный режим воздействия СВЧ - полем, как отмечено авторами, может не дать положительного результата.

Следует отметить, что длительность воздействия СВЧ-волн определяет не только эффект разупрочнения и упрочнения, но и величину потребляемой энергии.

Конечной целью наших исследований является снижение энергоемкости измельчения руд и минералов, уменьшение износа металлических частей мельниц и увеличение выхода полезных компонентов при их извлечении из руд и минералов. Для достижения поставленной цели отбирают пробу руды, из которой изготавливают навески (куски со средним размером 2 см по 25 штук для каждого режима СВЧ-воздействия). Опыты для каждого режима повторяются 5 раз.

В одном опыте измельчается по 5 кусков руды свободно падающим грузом по известной методике определения коэффициента крепости по толчению [5].



Из рудного месторождения отбирают необходимое, для обеспечения представительности, количество минерала или руды (обычно отбирают по одной пробе из каждого места, в котором нужно определить показатели, чтобы можно было получить не менее 30 навесок по 5 кусков каждая). Навески должны состоять из 5 кусочков размером в 20-25 мм в поперечнике каждый, которые получают, раскалывая отобранные пробы. Для каждого отдельного определения используется, как указано выше, 5 навесок. Полученные этим методом данные отличаются сравнительно невысоким коэффициентом вариации, равным в среднем 10-15%. Поэтому для получения надежной средней величины коэффициента крепости и удельной энергоемкости измельчения производится по 5 определений для каждой продолжительности СВЧ-воздействия на одной и той же пробе породы. Для определения коэффициента крепости разработан специальный прибор ПОК (прибор для определения крепости), состоящий из трубчатого копра, измерителя мелкой фракции. Каждая отдельная навеска дробится в стакане вертикально трубчатого копра прибора ПОК гирей массой 2,4 кг, сбрасываемой с высоты 600мм. В случае необходимости изменение величины работы разрушения при толчении целесообразно производить только варьированием числа ударов падающей гири по навеске.

Вес гири и высоту ее сбрасывания следует оставлять постоянными. Получавшаяся после толчения мелочь высыпается из стакана копра на сито с отверстиями 0,5мм, и по отдельности 5 навесок, раздробленных в копре прибора, просеивается. Фракция размером мельче 0,5мм (прошедшая через сито с этим размером) собирается и насыпается в стакан объеммера диаметром 23 мм, при помощи которого определяется высота столбика этой пылевой фракции. Величина коэффициента крепости исследуемой горной породы вычисляется по отношению затраченной на дробление работы к вновь образованной поверхности по эмпирической формуле М.М. Продьяконова

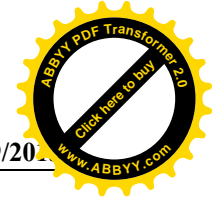
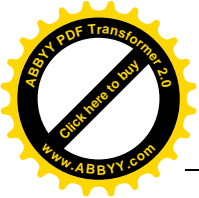
$$f_T = \frac{20n}{l} \quad (1),$$

где  $n$  – число ударов свободно падающего груза по одной навеске;

$l$  – высота столбика пыли в объемере, мм.

$f_T$  - коэффициент крепости по толчению.

Обычно для руд с низкой и средней прочностью производят в зависимости от прочности руды от 3 до 15 ударов. Для подавляющего большинства руд кривая зависимости выхода пыли, характеризуемого величиной  $l$ , зависящей от затраченной на дробление работы  $A$ , имеет тенденцию к выполаживанию при больших значениях  $A$ . Поэтому рекомендуется подбирать для каждой испытываемой руды соответствующее определенной работе  $A$ , число ударов при разрушении навески, чтобы выход пыли  $l$  был примерно в пределах от 20 до 70мм. В формуле (1)  $20n$  - пропорционально работе, затраченной на дробление навески, а  $l$  пропорционально вновь образованной поверхности.



После определения коэффициента крепости величина удельной (объемной) энергоемкости измельчения руды –  $K$ -при разных величинах длительности СВЧ-воздействия определяется по предложенной нами формуле:

$$K = \frac{nE_i}{V} \quad (2) \quad \text{или} \quad K = \frac{n \cdot mgh}{Sl} \quad (3)$$

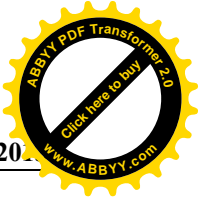
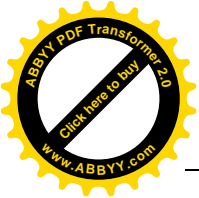
где  $E_i$  - энергия единичного удара;  $V$  -объем фракции с размером менее 0,5 мм;  $m$  –масса свободно падающего груза;  $g$  -ускорение свободного падения;  $n$  –число ударов свободно падающего груза по одной навеске;  $l$  –высота столбика пыли в объемомере, мм.;  $h$  -высота падения груза;  $S$  -площадь сечения объемомера.

По полученным пяти значениям показателей определяется среднеарифметические величины.

Исследованиями установлено, что вновь образованная при дроблении хрупкого материала поверхность складывается в основном (примерно на 90%) из поверхности мельчайших кусочков величиной менее 0,5 мм. Поэтому для значительного упрощения метода после дробления определяется поверхность только мелких фракций - менее 0,5 мм – то есть величина высоты столбика пыли в объемомере при этом пропорциональна вновь образованной поверхности полученных при дроблении кусочков [5].

**Результаты исследований.** По предложенному методу - по данным определения удельной энергоемкости измельчения для исходного состояния (не подвергнутое к облучению состояние), и для разных величин длительности СВЧ-воздействия, путем построения графика зависимости «удельная энергоемкость измельчения – продолжительность време-ни воздействия СВЧ-волн» (рисунок 1,2,3,4), определяют оптимальное значение продолжительности времени воздействия СВЧ-волн, соответствующее минимальному значению удельной энергоемкости измельчения данной руды. Оптимальное значение продолжительности времени воздействия СВЧ-волн принимают для обработки всей руды данного типа и размера кусков, подлежащих к измельчению в производственных условиях. Как видно из рисунков 1,2,3,4, оптимальное значение времени воздействия СВЧ-волн для известняка (карьер Ак-Татыр, Баткенская область), диорита (месторождение Токтозан), филлита серого (рудник Кумтор) составляет 3 минуты, а для кварца (рудник Восточный Коунрад) – 5 минут.

Для облучения используется СВЧ- печь (микроволновая печь). В печи электричество, проводимое магнетрону, используется для генерации микроволновой энергии. Микроволны проникают в зону воздействия через отверстия внутри печи и не могут проникать через металлические стенки печи. В печи можно выбирать 5 уровней микроволновой мощности. Использовался уровень мощности – 700 Вт. Частота микроволн – 2450 МГц. Полезный объем печи составляет 0,03 м<sup>3</sup>. Образцы руд навесками по 200–250 г и средними размерами 20-25 мм помещались вовнутрь печи и облучались СВЧ - импульсами.



Зависимость удельной энергоёмкости измельчения от времени воздействия СВЧ-волн (известняк к. Ак-Татыр, Баткенск. обл.)

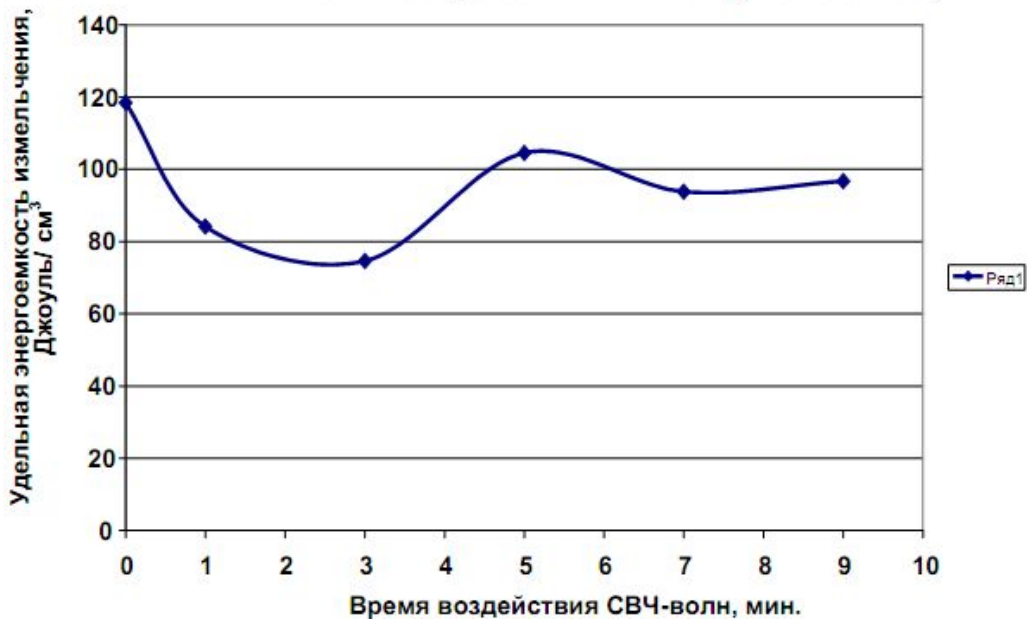


Рис. 1

Зависимость удельной объемной энергоёмкости измельчения диорита Токтозан от времени воздействия СВЧ-волн месторождения

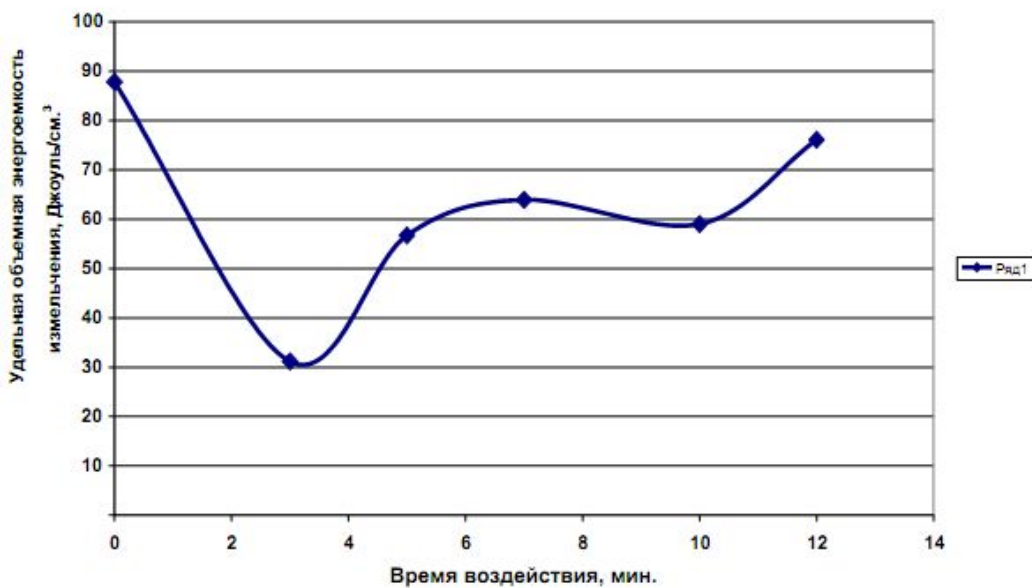


Рис. 2

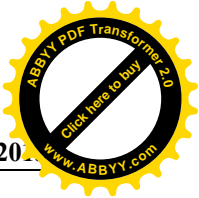
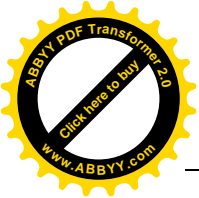


График зависимости удельной энергоёмкости разрушения от времени СВЧ облучения (филлит серый, Кумтор)

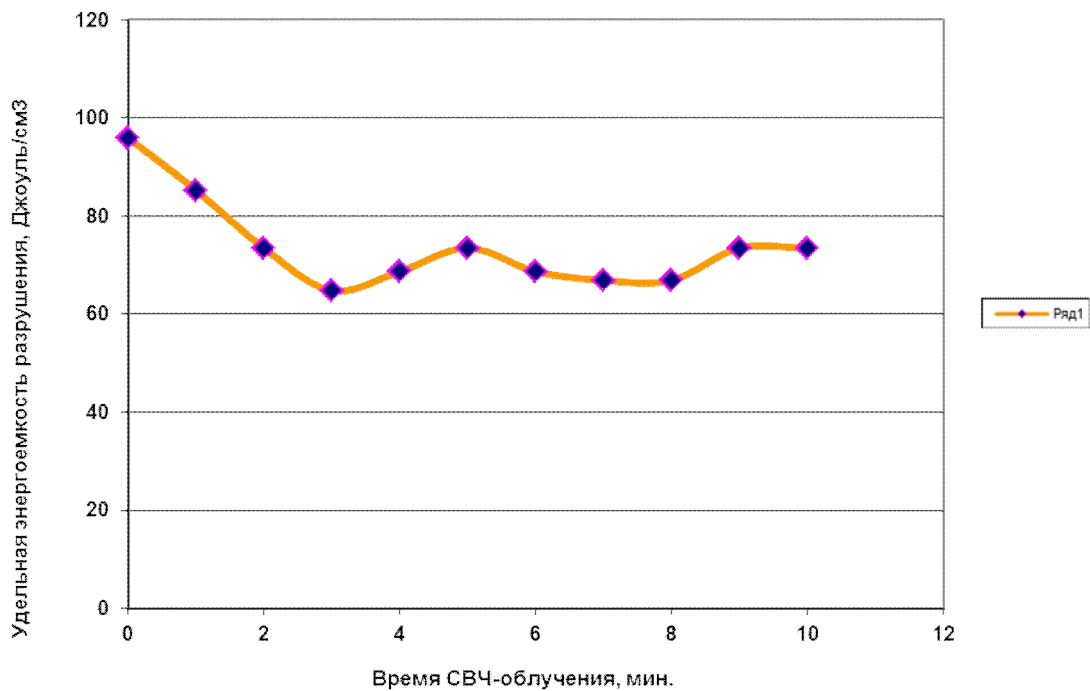


Рис. 3

Зависимость удельной объемной энергоёмкости измельчения кварца (Восточный-Коунрад, обр.7, ПК298+50) от времени воздействия СВЧ-волн

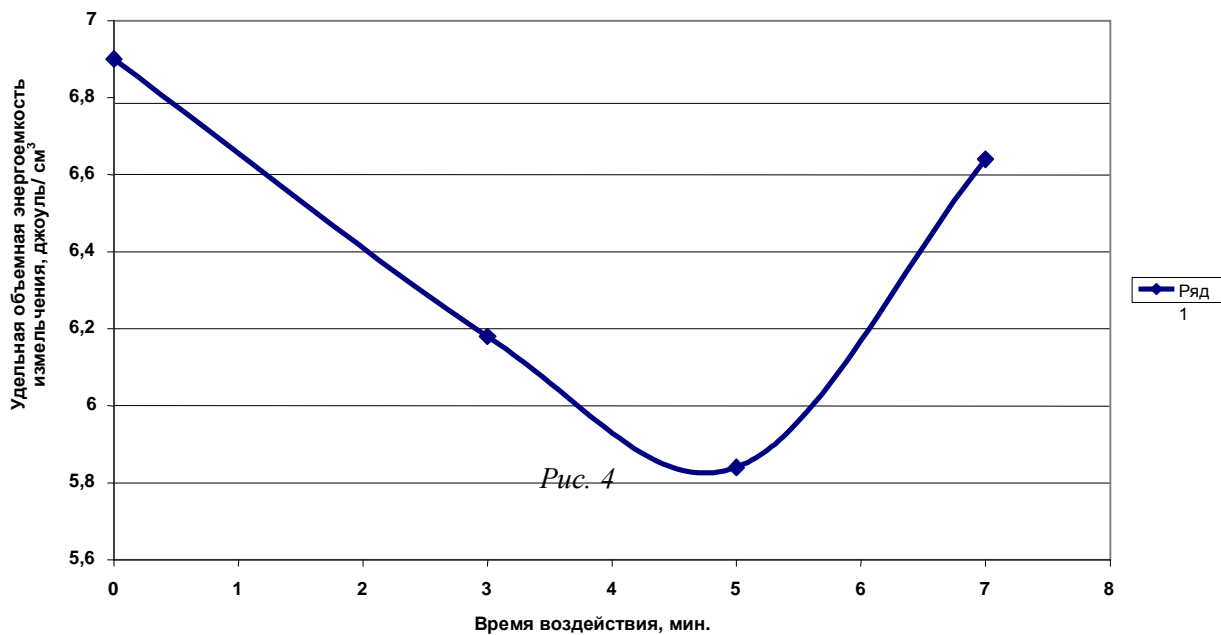
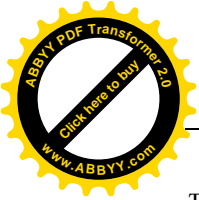


Рис. 4





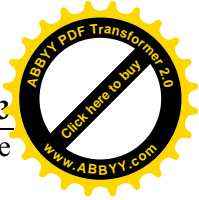
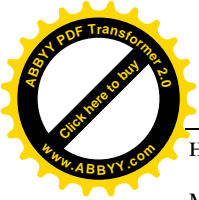
Первоначально определяются исходные данные, т.е. коэффициент крепости по толчению и удельно-объемная энергоемкость измельчения исходного (не облученного) состояния руды. Затем такие же куски из руды подвергаются воздействию СВЧ-волн в микроволновой печи. Режим выдержки в печи следующий: от одной до девяти минут через интервал 1 минуты, а в некоторых случаях от одной до двадцати минут через каждые 2-5 минут.

Следует отметить, что экономия энергии на помоле при предварительном воздействии СВЧ-волнами должна не только компенсировать энергозатраты на нагрев при предварительном СВЧ-воздействии, но и обеспечить существенную экономию энергии. При этом уменьшается износ металлических частей мельниц, увеличивается выход полезного компонента (извлекаемого металла) за счет улучшения раскрываемости минеральных зерен, так как при оптимальной продолжительности воздействия на руду СВЧ-волнами происходит существенное разупрочнение руды. Судя по снижению прочности, можно отметить, что уменьшение износа, следовательно, расхода металла в мельницах тоже будет значительным. Структурные анализы показали, что при воздействии СВЧ-волн улучшается раскрываемость зерен извлекаемых металлов и минералов, за счет чего увеличивается выход извлекаемого компонента. Например, как показывают наши опыты и расчеты, для диорита месторождения Токтозан удельная энергоемкость измельчения в исходном состоянии составляет  $87 \text{ Дж/см}^3$ , а после 3 минут воздействия СВЧ-волн –  $30 \text{ Дж/см}^3$  (рис. 2). Расход энергии при мощности печи  $0,7 \text{ кВт}$  и в течение 3 минут составляет  $0,7 \cdot 0,05 \text{ ч} = 0,035 \text{ кВт-час}$  или  $35 \text{ Вт-час} \cdot 3,6 \cdot 10^3 = 126000 \text{ Дж}$ . При полезном объеме печи  $30000 \text{ см}^3$  удельный расход энергии на 3 минутное СВЧ-облучение составляет  $126000 / 30000 = 4,2 \text{ Дж/см}^3$ . С учетом расхода энергии на СВЧ-облучение общая удельная энергоемкость измельчения составляет  $30 + 4,2 = 34,2 \text{ Дж/см}^3$ . Таким образом, экономия энергии при оптимальном СВЧ-облучении, по сравнению с необлученным (исходным) состоянием, составляет  $87 - 34,2 = 52,8 \text{ Дж/см}^3$ , или экономия энергии при измельчении диорита после СВЧ-облучения составляет  $60,7\%$ .

Для известняка (карьер Ак-Татыр) удельная энергоемкость измельчения в исходном состоянии составляет  $120 \text{ Дж/см}^3$ , а после 3 минут воздействия СВЧ-волн –  $73 \text{ Дж/см}^3$  (рис. 1). С учетом расхода энергии на СВЧ-облучение общая удельная энергоемкость измельчения составляет  $73 + 4,2 = 77,2 \text{ Дж/см}^3$ . Экономия энергии при оптимальном СВЧ-облучении, по сравнению с необлученным (исходным) состоянием, для известняка составляет  $120 - 77,2 = 42,8 \text{ Дж/см}^3$ , или экономия энергии при измельчении после СВЧ-облучения составляет  $35,7\%$ .

Следует отметить, что чем больше неоднородность руды, тем больше эффект разупрочнения и экономия энергии при измельчении после оптимального режима СВЧ-облучения, так как неоднородность вещественного состава и структуры приводит к





неоднородному нагреванию и формированию термонапряжений, обуславливая образование микротрещин.

Применение предлагаемого метода обеспечит экономический эффект за счет экономии энергии, уменьшения расхода металла, а также увеличение выхода полезного компонента (извлекаемого металла), улучшение раскрываемости минеральных зерен, так как при оптимальной длительности воздействия на руду СВЧ-волнами происходит существенное разупрочнение руд.

### Выводы

1. Для определения величины удельной (объемной) энергоемкости измельчения руды при разных величинах длительности СВЧ-воздействия предложена формула, представляющая собой отношение энергии измельчения руды свободно падающим грузом к объему измельченной руды фракции менее 0,5 мм.

2. Установлено, что оптимальное значение времени воздействия СВЧ-волн для известняка (карьер Ак-Татыр, Баткенская область), диорита (месторождение Токтозан), филлита серого (рудник Кумтор) составляет 3 минуты, а для кварца (рудник Восточный Коунрад) – 5 минут.

3. Разработан метод оптимального разупрочнения и измельчения крепких руд и минералов, позволяющий определить оптимальную продолжительность воздействия СВЧ-волн для руды данного типа и размера кусков, подлежащих измельчению.

4. Установлено, что экономия энергии при оптимальном СВЧ-облучении, по сравнению с необлученным (исходным) состоянием для диорита месторождения Токтозан составляет 60,7%, для известняка (карьер Ак-Татыр) - 35,7 % .

### Литература

1. Москалев А.Н. и др. Способ разрушения горных пород электромагнитными волнами. Авт. св. СССР № 724731, кл. E21C 37/18, 1977г.).

2. Абкин Е.Б. и др. Измельчение руд с применением электромагнитной энергии СВЧ. Обогащение руд. Ленинград, 1986, № 6, с 2-5.

3. Новик Г.Я., Зильбершмидт М.Г. Управление свойствами пород в процессах горного производства. М., Недра, 1994.

4. Зецер Ю.И. и др. Применение СВЧ - нагрева для рудоподготовки железистых кварцитов Михайловского горно-обогатительного комбината перед их обогащением. //Всес. У1 научно-практич. конф. "Применение СВЧ-энергии в технологич. процессах и научных исследованиях". Тезисы докл., Саратов, 1991, -с. 98-100.

5. Ильницкая Е.И., Тедер Р.И., Ватолин Е.С., Кунтыш М.Ф. Свойства горных пород и методы их определения. -М.: Недра. -1969. – 452 с.