

**Р.М. Султаналиева**

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ЭНЕРГОЕМКОСТИ И ОПТИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ КРЕПКИХ РУД ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СВЧ ВОЛН**

*Для эффективного разупрочнения и уменьшения энергоемкости измельчения крепких руд наиболее перспективны способы, основанные на воздействии электромагнитных волн свехвысокочастотного (СВЧ) диапазона. Приведены результаты исследований изменений температуры крепких руд от продолжительности времени воздействия СВЧ волн. Обоснована формула определения характерной температуры, при которой реализуется эффективное измельчения крепких руд.*

*Ключевые слова: руда; минерал; температура; микроволны; теплоемкость, удельная энергоемкость, измельчение.*

**В** настоящее время, решение проблемы повышения производительности обогащения, снижение энергоемкости измельчения, связано с изысканием эффективных методов их разупрочнения. Поэтому, большое значение приобретает способы разупрочнения руд с помощью воздействия более эффективных физических полей, например, тепловых полей и СВЧ облучение. Из всех известных, изученных видов энергии, с точки зрения влияния на физико-механические свойства пород и руд, наиболее перспективна энергия электромагнитного поля свехвысокочастотного (СВЧ) диапазона. К преимуществам разупрочнения горных пород в СВЧ электромагнитных полях относится: объемный характер преобразования излученной СВЧ энергии в тепловую, в пределах глубины проникновения в зависимости от частоты электромагнитного поля; высокая температура нагрева, позволяющая обеспечивать скорость разупрочнения, соизмеримую с принятыми скоростями механического нагружения.

Источником облучения СВЧ волн можно использовать микроволновую печь, средняя мощность которой составляет 1,5 МВт. СВЧ микроволны представляют собой форму энергии, аналогичную электромагнитным волнам, используемым в радио- и телевизионном вещании и обычному дневному свету. Обычно электромагнитные волны распространяются наружу через атмосферу и исчезают в пространстве без следа. В микроволновых печах имеется магнетрон, с помощью которого, электричество, используется для генерации микроволновой энергии. Испытуемые образцы горных пород помещаются в СВЧ печь. Предварительно определяются исходные физико-механические свойства этих пород в условиях комнатной температуры. Продолжительность выдержки в печи составляет от одного до десяти минут, интервалом две минуты. В печи можно выбирать 5 уровней микроволновой мощности. Было использовано уровень мощности – 700 Вт. Частота микроволн составляет – 2450 МГц. Полезный объем печи составляет 0,03 м<sup>3</sup>. Масса навесок по 200–250 г и средними размерами 20–25 мм.

Разупрочнение горных пород (руд) при воздействии СВЧ волн связано, прежде всего, с их нагревом, при этом, энергия СВЧ поля поглощается породой и превращается в тепловую энергию, температура породы повышается на  $dT$ . Для повышения температуры породы массой  $m$  на  $dT$  необходима энергия  $W = mcdT$ , а  $W = Pt$ , отсюда выразим:

$$dT = \frac{Pt}{c\rho} \quad (1),$$

где  $P$  – мощность СВЧ поля, поглощаемая единицей объема породы;  $t$  – время воздействия СВЧ поля;  $C$  – удельная теплоемкость породы;  $\rho$  – плотность породы.

Подставляя  $dT = T_2 - T_1$  и  $P = N/V$  в формулу (1), получим

$$T_2 - T_1 = \frac{Nt}{VC\rho}, \quad (2)$$

где  $V$  – объем навески породы;  $T_1$  – первоначальная температура, К;  $T_2$  – температура при исследуемой длительности нагрева ( $t$ , с) в К;  $N$  – мощность СВЧ установки.

Температуру породы для разной длительности воздействия СВЧ волн можно определить по формуле (2).

В поле воздействия СВЧ волн электропроводящие и полупроводящие минералы значительно нагреваются, тогда как, диэлектрические практически не нагреваются. Для нагрева диэлектриков можно использовать более высокие частоты, но этому препятствует уменьшение глубины проникновения СВЧ-поля. Поэтому максимальной разрешенной частотой, используемой в СВЧ-энергетике, является частота 2,45 ГГц [3].

Определим температуру нагрева руды, для продолжительности действия СВЧ волн  $t = 40$  с, диорита месторождения Токтозан. Удельная теплоемкость

$$C_0 = \frac{0,65 \text{ кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \text{ берем из таблицы [2]; размеры навески (пробы) } 2 \times 2 \times 2,5 \text{ см;}$$

$$\rho = 2700 \text{ кг/м}^3; V = (2 \times 2 \times 2,5) \cdot n = (2 \times 2 \times 2,5) \cdot 5 = 50 \text{ см}^3,$$

где  $n$  – количество кусков навески.

$$(T_2 - T_1) = \Delta T; \Delta T = \frac{Nt}{C\rho V} \quad (3)$$

Подставляя соответствующие значения величин, получаем

$$\Delta T = \frac{Nt}{C\rho V} = \frac{700 \text{ Дж/с} \cdot 40 \text{ с}}{\frac{0,65 \text{ кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 0,00005 \text{ м}^3 \cdot 2700 \text{ кг/м}^3} = \frac{28 \text{ кДж}}{0,088 \text{ кДж/К}} = 318 \text{ К;}$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 318 + 20 = 338 \text{ К; или } T_2 = 338 - 273 = 65 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Таким же путем определяются температуры для продолжительности времени облучения от одной до десяти минут, интервалом в две минуты.

Известно, что при повышении температуры повышается удельная теплоемкость горных пород [1, 5].

Считают, что при температуре от 273 до 773 К (от 0 до 500 °С) теплоемкость горных пород изменяется практически по линейному закону [5].

Для определения удельной теплоемкости горных пород для соответствующей температуры, запишем

$$C_T = C_0 + C_0 \cdot T_K \quad (4),$$

где  $C_T$  – удельная теплоемкость при температуре  $T$ ;  $C_0$  – удельная теплоемкость исходного состояния (начальная, при комнатной температуре);  $T_K$  – коэффициент пропорциональности.

При увеличении продолжительности действия СВЧ волн более 1 минуты температура горной породы повышается не строго по линейному закону и поэтому необходимо найти зависимость удельной теплоемкости от продолжительности воздействия СВЧ волн. На основе экспериментальных исследований и с учетом формулы (4) (совместно с Тажибаевым К.Т.) получена следующая зависимость удельной теплоемкости горных пород [4].

$$C_T = C_0 + C_0 \frac{t_m R_m}{4} = C_0 \left( 1 + \frac{t_m R_m}{4} \right) \quad (5),$$

где  $t_m$  – продолжительность СВЧ воздействия, в минутах;  $R_m$  – коэффициент размерности времени, 1/минут.

Формула (5) справедлива для температур от 0 до 1000 °С, т.к. выше этой температуры в горных породах возможны процессы разложения.

Как указано выше, для диорита (Токтозан)  $C_0 = 0,65 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$  [2]. Определим, на основе полученной нами формулы (5), теплоемкость данной руды для продолжительности времени воздействия СВЧ волн равной 1 минуте:

$$C_T = C_0 \left( 1 + \frac{t_m R_m}{4} \right) = 0,65 \left( 1 + \frac{1}{4} \right) = 0,81 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

с учетом найденного значения для продолжительности времени воздействия СВЧ волн равной 1 минуте, определяем температуру нагрева воздействия волн.

$$\Delta T = \frac{Nt}{C \rho V} = \frac{700 \text{Дж} / \text{с} \cdot 60 \text{с}}{0,81 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 0,00005 \text{м}^3 \cdot 2700 \text{кг} / \text{м}^3} = \frac{42 \text{кДж}}{0,11 \text{кДж}} = 381 \text{ К};$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 381 + 20 = 401 \text{ К}; \text{ или } T_2 = 401 - 273 = 128 \text{ } ^\circ\text{С}.$$

Для продолжительности времени воздействия СВЧ волн 2 минуты

$$C_T = 0,65 \left( 1 + \frac{2}{4} \right) = 0,975 \frac{42 \text{кДж}}{0,11 \text{кДж}}, \text{ тогда}$$

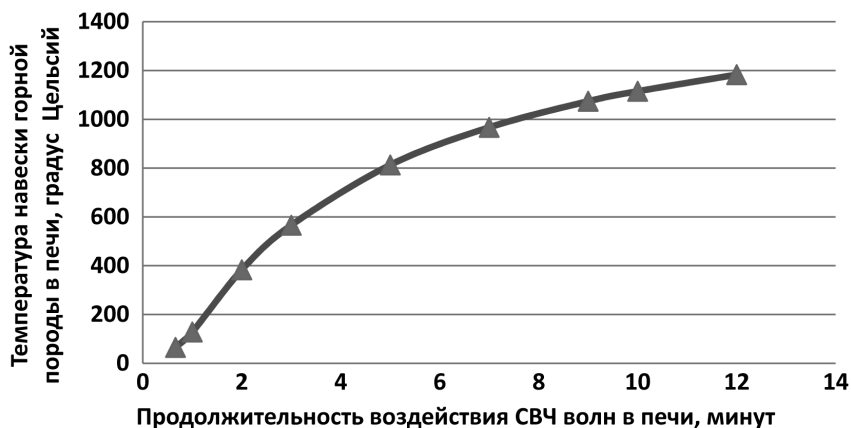
$$\Delta T = \frac{Nt}{C \rho V} = \frac{700 \text{Дж} / \text{с} \cdot 120 \text{с}}{0,975 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 0,00005 \text{м}^3 \cdot 2700 \text{кг} / \text{м}^3} = \frac{84 \text{кДж}}{0,132 \text{кДж}} = 636 \text{ К};$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 636 + 20 = 656 \text{ К}; \text{ или } T_2 = 656 - 273 = 383 \text{ } ^\circ\text{С}.$$

Таким образом, время выдержки продолжается до 10 минут, с интервалом времени 2 минуты.

На рис. 1 представлен график изменения температуры диорита месторождения Токтозан от продолжительности СВЧ воздействия.

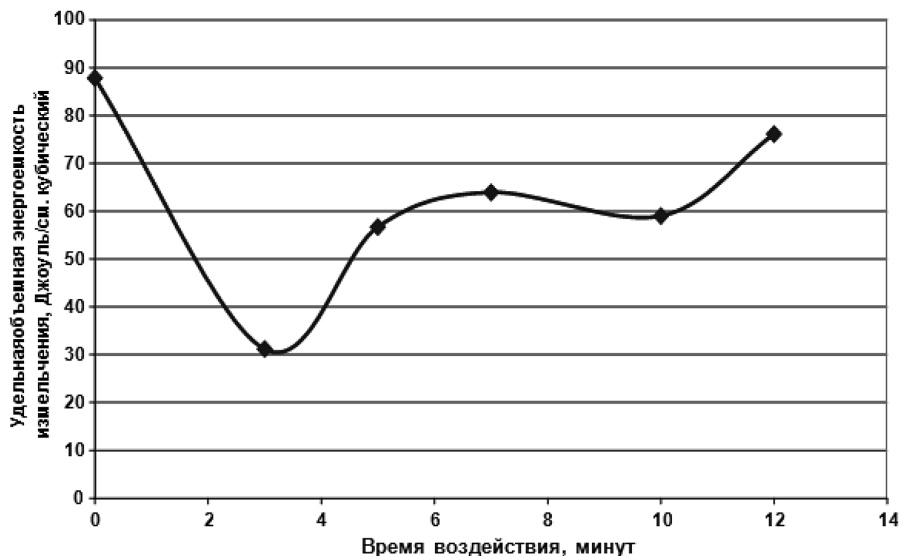
Как видно из рисунка 1, выше 5660 С, температура руды изменяется не линейно. Отметим, что температура 5660 С соответствует 3-х минутному СВЧ воздействию и при этой продолжительности времени воздействия волн обеспе-



**Рис. 1.** График изменения температуры навески руды (диорит, Токтозан) от продолжительности воздействия СВЧ волн

чивается минимальная удельная энергоёмкость измельчения (см.рис 2). Дальнейшее увеличение времени воздействия волн, наоборот, приводит к увеличению энергоёмкости измельчения (рассматриваются и представлены средние значения данного показателя). Таким образом, переломное время воздействия СВЧ волн – 3 минуты, следовательно температура 5660 С может служить характеристикой для диорита Токтозанского месторождения, при которой реализуется эффективное измельчение.

Результаты определения температуры с помощью формулы (5) для разных пород отобранных из разных месторождений, хорошо согласуется с экспериментальными значениями энергоёмкости измельчения горных пород.



**Рис. 2.** Зависимость удельной объемной энергоёмкости измельчения диорита месторождения Токтозан от времени СВЧ воздействия (микроволновая печь)

## Выводы

Установлено, что при продолжительности действия СВЧ волн более одной минуты, температура горной породы повышается не строго линейному закону.

Определено переломное время воздействия СВЧ волн и характерная для данной породы температура, при которой реализуется эффективное измельчения руд и минералов, достигается минимум энергоёмкости их измельчения.

Получена эмпирическая формула для определения удельной теплоёмкости и переломной температуры крепких руд и минералов после воздействия СВЧ волн.

---

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильницкая Е.И. и др. Свойства горных пород и методы их определения. – М.: Недра, 1969. – 452 с.
2. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород / Под ред. Н.В. Мельникова, В.В. Ржевского, М.М. Протодаьяконова. – М.: Недра, 1975. – 279 с.
3. Диденко А.Н., Зверев Б.В. СВЧ-энергетика. – М.: Наука, 2000. – 264 с.
4. Султаналиева Р.М., Акматалиева М.С., Тажибаев Д.К. Способ измельчения руд и минералов. Патент Кыргызской Республики № 1503. 31.10.2012 г.
5. Дмитриев А.П., Гончаров С.А. Термодинамические процессы в горных породах: учебник для вузов. – М.: Недра, 1990. – 360 с.
6. Емелин М.А. и др. Новые методы разрушения горных пород. – М.: Недра, 1990.
7. Петров В.М. Новые применения радиоэлектроники: разупрочнение горных пород мощным электромагнитным полем СВЧ // Радиоэлектроника и телекоммуникации. – 2002. – № 4. – С. 34–42. **ПАБ**

---

## КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Султаналиева Рая Мамакеевна – кандидат физико-математических наук, профессор, Кыргызский государственный технический университет им. И.Р. Раззакова, Кыргызстан, e-mail: raia-ktu@mail.ru.

---

UDC 622.023

## DETERMINATION OF THE SPECIFIC ENERGY INTENSITY AND OPTIMUM TEMPERATURE OF THE STRONG ORES AFTER INFLUENCE OF MICROWAVES

Sultanalieva R.M., Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, 720044, Bishkek, Kyrgyzstan, e-mail: raia-ktu@mail.ru.

---

*To effectively reduce the energy intensity of softening and crushing hard ore, are most perspective methods, based on the effects of electromagnetic waves (UHF) range. The results of investigations of temperature changes of ores on the duration of exposure to microwaves. Is substantiated formula for determining the characteristic temperature at which the realized effective grinding of ores and minerals.*

*Key words: ore; mineral; temperature; microwave; heat capacity. energy intensity, grinding.*

## REFERENCES

1. Il'nitskaya E.I. *Svoystva gornykh porod i metody ikh opredeleniya* (Properties of rocks and methods for determination), Moscow, Nedra, 1969, 452 p.
2. *Spravochnik (kadastr) fizicheskikh svoystv gornykh porod*. Pod red. N.V. Mel'nikova, V.V. Rzhetskogo, M.M. Protod'yakonova (Information guide (cadastre) on properties of rocks. Mel'nikov N.V., Rzhetsky V.V., Protod'yakonov M.M. (Eds.)), Moscow, Nedra, 1975, 279 p.
3. Didenko A.N., Zverev B.V. *SVCh-energetika* (СВЧ-энергетика), Moscow, Nauka, 2000, 264 p.
4. Sultanalieva R.M., Akmatalieva M.S., Tazhibayev D.K. *Patent of Kyrgyz Republic no 1503*, 31.10.2012.
5. Dmitriev A.P., Goncharov S.A. *Termodinamicheskie protsessy v gornykh porodakh: uchebnyk dlya vuzov* (Thermodynamic processes in rocks, Textbook for high schools), Moscow, Nedra, 1990, 360 p.
6. Emelin M.A. *Novye metody razrusheniya gornykh porod* (New methods of rock destruction), Moscow, Nedra, 1990.
7. Petrov V.M. *Radioelektronika i telekommunikatsii*. 2002, no 4, pp. 34–42.