СТАТЬИ

УДК 622.02

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЕМКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНОЙ ПОРОДЫ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕМПЕРАТУРНО-ВРЕМЕННОГО РЕЖИМА СВЧ-ПОЛЕЙ

[1]Султаналиева Р.М., [1]Конушбаева А.Т., [2]Турдубаева Ч.Б.

[1]Кыргызский государственный технический университет имени И. Раззакова, Бишкек, e-mail: raia-ktu@mail.ru, aikat80@mail.ru;

[2]Политехнический колледж при КГТУ им. И. Раззакова, Бишкек, e-mail: myrzaika42@gmail.com

В статье рассмотрены основные направления развития исследований в области разрушения горных пород, используемого при добыче полезных ископаемых. В технологическом процессе при подготовке горных пород к обогащению возникают проблемы разупрочнения, разрушения. Высокую эффективность разупрочнения или разрушения горных пород показали термические и низкочастотные электрофизические способы, СВЧ-облучение. Поэтому развитие метода оптимизации температурно-временного режима электромагнитного поля сверхвысоких частот при его воздействии на характеристики разрушения горных пород, позволяющего принимать рациональные технологические решения по энерго- и ресурсосбережению, является актуальной задачей. В статье приведены результаты исследований, выполненных за последнее время. Рассматривается зависимость прочностных свойств горных пород от воздействия волн сверхвысоких частот при разных температурно-временных режимах. При анализе изменения свойств пород и энергоемкости измельчения использовались методы лабораторных измерений и расчетных алгоритмов в среде Матлаб. Когда изменяется температура горных пород, под действием СВЧ-волн, возникают структурные термические напряжения на границах минеральных зерен, а также процессы, изменяющие физические свойства. Аналитически определены минимальные удельные энергоемкости горных пород при разном времени воздействия волн сверхвысоких частот. Выявлено оптимальное время воздействия волн сверх высоких частот и температура соответствующие минимальной удельной энергоемкости разрушения для конкретных горных пород.

Ключевые слова: удельная энергоемкость, температурно-временной режим, оптимальное время, горная порода, минерал, разупрочнение, коэффициент крепости, СВЧ-волны, измельчение руды, прочность

INVESTIGATION OF ENERGY-INTENSIVE ROCK DESTRUCTION EXPOSURE TEMPERATURE-TIME MODE MICROWAVE FIELDS

[1]Sultanalieva R.M., [1]Konushbaeva A.T., [2]Turdubaeva Ch.B.

[1]Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, e-mail: raia-ktu@mail.ru, aikat80@mail.ru;

[2]Polytechnic College at the Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, e-mail: myrzaika42@gmail.com

Destruction refers to the main problems of mining, indicating the possibility of mining and processing rocks, ores and minerals, building materials. In the technological process, when preparing rocks for enrichment, problems of softening and destruction arise. The technology for extracting metals and minerals from hard ores requires significant energy and material costs. To extract metals or other valuable minerals from strong polymineral rocks, complex technological work is carried out on their crushing and grinding. The technology for extracting metals and minerals from hard ores requires significant energy and material costs. To extract metals or other valuable minerals from strong polymineral rocks, complex technological work is carried out on their crushing and grinding. High efficiency of softening or destruction of rocks was shown by thermal and low-frequency electrophysical methods, microwave irradiation. Therefore, the development of a method for optimizing the temperature-time regime of an electromagnetic field of ultrahigh frequencies when it affects the rock destruction characteristics, which makes it possible to make rational technological decisions on energy and resource conservation is an urgent task. The article discusses the dependence of the strength properties of rocks on the effects of waves at high frequencies at different temperature-time regimes. To study the physicomechanical properties of the studied rocks under the influence of microwave fields, methods of dynamic destruction, design and experimental studies were used. In the analysis of changes in rock properties and grinding energy intensity, laboratory measurements and calculation algorithms were used in the Matlab environment. When the temperature of rocks changes, under the influence of microwave waves, structural thermal stresses arise at the boundaries of mineral grains, as well as processes that change physical properties. The specific heat of rocks has been analytically determined for different times of exposure to waves at high frequencies. The optimal time of exposure to waves at high frequencies and the temperature corresponding to the minimum specific energy intensity of destruction for specific rocks are revealed.

Keywords: specific energy consumption, temperature-time regime, optimal time, rock, mineral, softening, strength coefficient, microwave waves, ore grinding, strength

Горные породы, содержащие ценные полиминералы, в основном имеют высокую прочность. Для таких горных пород использование традиционных способов измельчения приводит к существенным потерям извлекаемых металлов, возрастанию энергетических затрат, износу металлических частей мельниц. Способы разрушения подразделяются на механические, термические, электрофизические,

электромагнитные, термомеханические, электротермические. Все эти способы направлены на достижение наименьших значений пределов прочности обрабатываемых материалов, что облегчает последующее механическое измельчение руды до размера частиц, необходимого для дальнейшей флотации (т.е. для отделения минералов от содержащей их породы).

Применительно к разрушению и дроблению горных пород, как показали выполненные исследования, перспективны СВЧ-способы.

Под влиянием волн сверхвысоких частот на горную породу (образец горной породы), в зависимости от времени воздействия исследуемый образец поглощает энергию СВЧ-поля и эта энергия переходит в тепловую энергию. При этом температура горной породы повышается на dT [1, 2].

$$dT = \frac{Nt}{c\rho}, \qquad (1)$$

где ρ – плотность породы, кг/м^3; t – время воздействия поля сверхвысоких частот, мин.; N – мощность СВЧ-поля (мощность микроволновой печи) поглощаемая единицей объема породы, Вт; c – удельная теплоемкость исследуемой породы, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг*К}}$.

Из формулы (1), с учетом разности температур $dT = T_2 - T_1$ получим

$$T_2 - T_1 = \frac{N\,t}{V\,C\rho}, \qquad (2)$$

где T_1 – первоначальная температура, К, T_2 – температура при исследуемой длительности нагрева (t, c) в К; V – объем исследуемого образца породы [3, 4].

Исследуемые образцы подвергаются воздействию СВЧ-волн, при этом время облучения изменяется от 1 мин до 12 мин. В зависимости от времени облучения, температура горной породы повышается, происходит изменение удельной теплоемкости от времени воздействия СВЧ-волн. Зависимость удельной теплоемкости горных пород от продолжительности действия СВЧ-волн получена на основе экспериментальных исследований К.Т. Тажибаевым и Р.М. Султаналиевой [5].

$$C_T = C_0 + C_0\,\frac{t_{m\,R_m}}{4} = C_0\left(1 + \frac{t_{m\,R_m}}{4}\right), \qquad (3)$$

где C_0 – удельная теплоемкость образца исходного состояния (начальная, для комнатной температуры), $\frac{\text{Дж}}{\text{кг*К}}$; t_m – время воздействия волн сверхвысоких частот, в минутах; R_m – коэффициент размерности времени, 1/минут.

Формула (3) справедлива для температур от 0 до 1000 °С, так как выше этой температуры в горных породах возможны процессы разложения [6].

По этой формуле были определены минимальные удельные теплоемкости исследуемых горных пород в зависимости от температуры воздействия СВЧ-волн разной продолжительности.

Минимальную удельную энергоемкость разрушения руд, горных пород и минералов в зависимости от температуры воздействия СВЧ-волн, можно аналитически определить по формуле (4). Как видно из формулы, изменение удельной энергоемкости разрушения горных пород (руд) зависит от времени воздействия температуры СВЧ волн [7].

$$q_{\min} = 6\,cm\,\sigma^2\,k\left(1 - 2\mu\right) / \left(\beta^2\,TE^2\right), \qquad (4)$$

где μ – коэффициент Пуассона, c – минимальная удельная теплоемкость горных пород, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг*К}}$; σ – предел прочности, Па; k – коэффициент пластичности горной породы, β – коэффициент объемного теплового расширения породы, 1/°С; E – модуль Юнга, Па; T – температура воздействия волн сверхвысоких частот, °С.

Цель исследования: определение оптимального времени воздействия волн сверх высоких частот и температуры соответствующие минимальной удельной энергоемкости разрушения для горных пород.

Для научного исследования использовались материалы (образцы горных пород), отобранные из разных рудных месторождений Кыргызстана. Для исследования влияния продолжительности воздействия СВЧ-волн на энергоемкость измельчения горных пород, использован метод толчения руды. При этом величина удельной энергоемкости измельчения руды вычислялась как произведение величины энергии единичного удара на число ударов свободно падающего груза по одной измельчаемой навеске, отнесенное к объему измельченной фракции с размером менее 0,5 мм. Для исследуемых горных пород: диорита (Токтозанского месторождения) и филлита (Кумторского месторождения) определены удельные энергоемкости разрушения, в зависимости от температуры воздействия СВЧ-волн разной продолжительности. Продолжительность действия СВЧ-волн задавалась дискретно: от 1 до 9 мин. Выявлено, что разупрочнение породы происходит в течение первых трех и пяти минут облучения, а затем, при более длительном воздействии

облучения, упругие характеристики стабилизируются и горная порода упрочняется.

Минимальная энергоемкость разрушения диорита Токтозанского месторождения с учетом следующих данных: $V = 0{,}00005$ м^3, $\rho = 2700$ кг/м^3, $m = 0{,}135$ кг, $c_0 = 0{,}65\ \frac{\text{кДж}}{\text{кг*К}}$, $\sigma = 250$ МПа, $Y = 7{,}4$ Па, $\mu = 0{,}3$, $k = 1{,}2$, $\beta = 7\cdot10^{-6}$ 1/°C и филлита серого Кумторского месторождения с учетом следующих данных $c_0 = \frac{0{,}79\ \text{кДж}}{\text{кг*К}}$, $V = 0{,}00005$ м^3, $\rho = 3000$ кг/м^3, $m = 0{,}15$ кг, $\sigma = 375$ Мпа, $Y = 7{,}4$ Па, $\mu = 0{,}3$, $k = 1{,}2$, $\beta = 7\cdot10^{-6}$ 1/°C, определились по формуле (4).

Температура породы для разной длительности воздействия СВЧ-волн была определена по формуле (2). Все расчетные данные и графические анализы результатов получены с помощью программы MATLAB [8].

В табл. 1 и 2 приведены результаты расчетного и экспериментального определения минимальной удельной энергоемкости разрушения от воздействия СВЧ-волн, разного температурно-временного режима, для диорита Токтозанского месторождения и филлита серого Кумторского месторождения. Как показывают результаты, для исследуемых образцов горных пород, результаты расчетного и экспериментального определения минимальной удельной энергоемкости разрушения, при разных времени воздействия волн сверхвысоких частот, показывает, что отклонение расчетных данных минимальной удельной энергоемкости измельчения от экспериментальных значений составляет в среднем 11–14 %.

Из рис. 1 и 3 видно, что для диорита и филлита, когда температура облучения в пределах 356 °C и 566 °C, энергоемкость разрушения исследуемых пород уменьшается, а дальнейшее увеличение времени воздействия СВЧ-волн минимальная энергоемкость разрушения горных пород изменяется нелинейно. Минимальная энергоемкость измельчения горных пород при температуре от 0 до 300 °C (от 273 до 573 К от) изменяется практически по линейному закону.

Таблица 1

Экспериментальные и расчетные значения минимальной энергоемкости разрушения от температуры воздействия СВЧ-волн диорита Токтозанского месторождения [9]

t, мин время СВЧ-облучения	t, °C температура нагрева породы	c, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг*К}}$ удельная теплоемкость	q_{min}, Дж/см^3 минимальная энергоемкость разрушения	
			Расчетное значение	Экспериментальное значение
1	128	0,81	67.3089	72
2	383	0,975	43.0543	45
3	566	1,14	28.2404	32
5	813	1,462	36.2856	43
7	967	1,788	56.7451	57
9	1074	2,11	57.7920	62
10	1115	2,275	62.4779	64

Таблица 2

Экспериментальные и расчетные значения минимальной энергоемкости разрушения от температуры воздействия СВЧ-волн филлита серого Кумторского месторождения [9]

t, мин время СВЧ-облучения	t, °C температура нагрева породы	с, кДж/кг·К удельная теплоемкость	q_{min}, Дж/см^3 минимальная энергоемкость разрушения	
			Расчетное значение	Экспериментальное значение
1	31	0,99	79.976	85
2	222	1,18	67.643	72
3	356	1,38	58.087	63
5	533	1,78	64.453	69
6	598	1,975	68.089	74
7	649	2,17	62.154	68
9	726	2,57	61.742	67

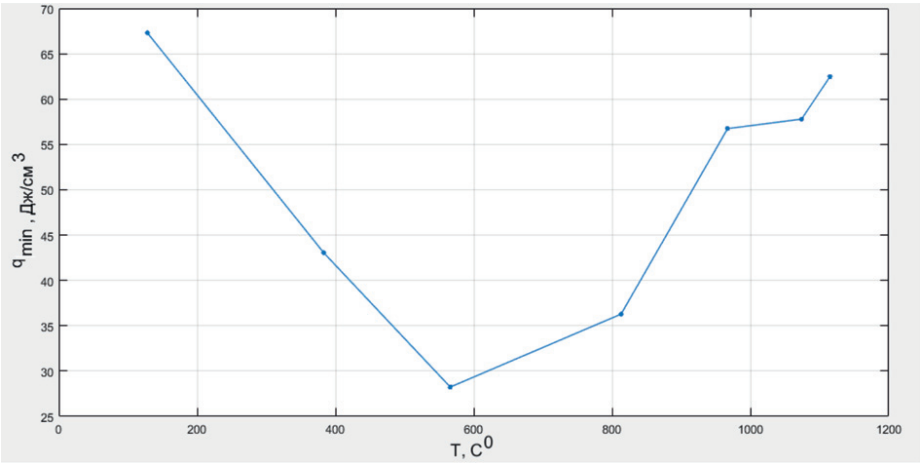

Рис. 1. Зависимость энергоемкости разрушения от температуры воздействия СВЧ-волн (диорит, Токтозан) [9]

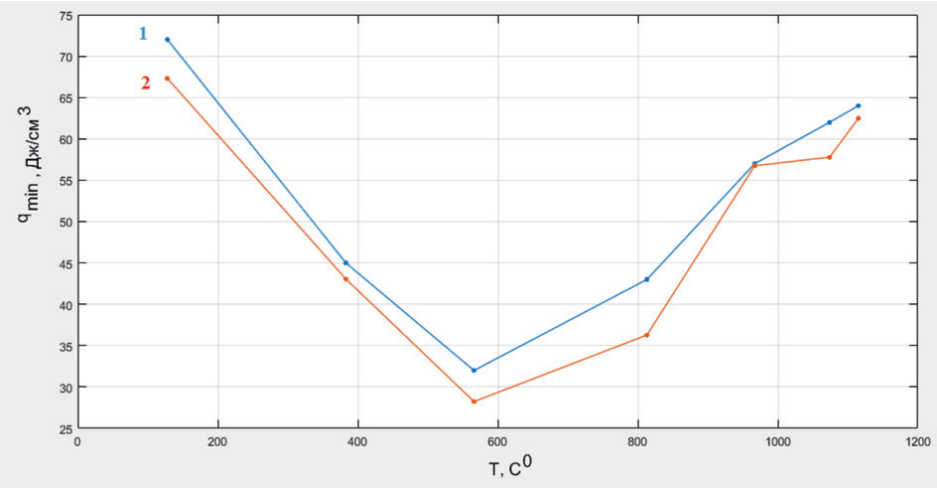

Рис. 2. Графики экспериментального – 1 и расчетного – 2 определения удельной энергоемкости разрушения диорита Токтозанского месторождения филлита Кумторского месторождения [9]

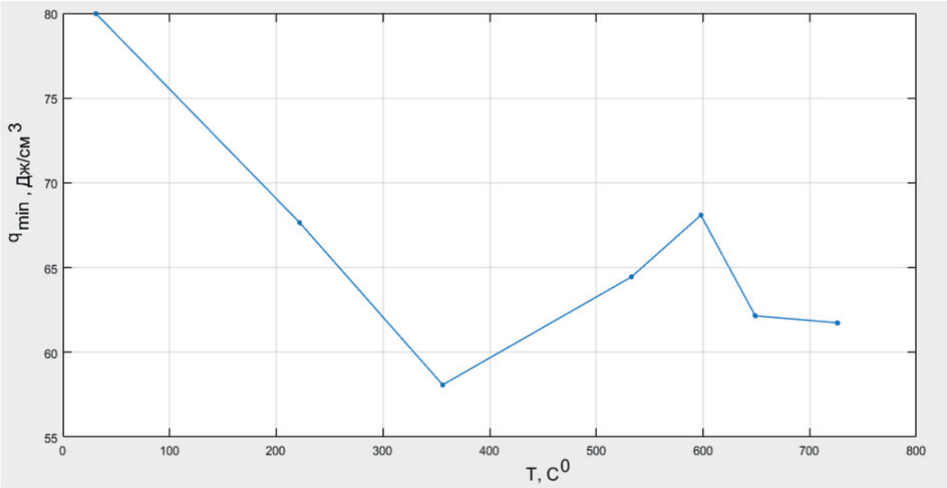

Рис. 3. Зависимость энергоемкости разрушения от температуры воздействия СВЧ-волн (филлит серый, Кумтор) [9]

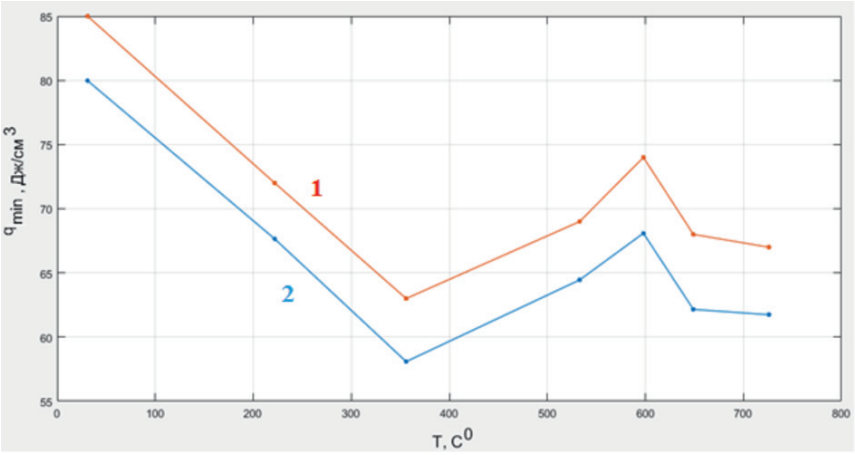

Рис. 4. Зависимость удельной энергоемкости разрушения филлита Кумторского месторождения 1 – экспериментальный, 2 – расчетный [9]

Для диорита и филлита 3-минутное СВЧ-воздействие соответствует температуре 566 °С и 356 °С, а дальнейшее увеличение времени воздействия волн сверхвысоких частот, наоборот, приводит к увеличению энергоемкости разрушения.

Когда время облучения составляет от трех до пяти минут, происходит неравномерное поглощение энергии СВЧ-излучения, а это приводит к изменению физико-механических свойств горной породы. Горные породы, содержащие металлы, в малом времени облучения сильно поглощают СВЧ-поле, на границах минеральных зерен возникают термомеханические напряжения и приводят к нарушению сплошности горных пород. А дальнейшее увеличение времени воздействия СВЧ-волн приводит к выравнению градиента температуры по всему объему образца и снимается термомеханическое напряжение. Из-за этого восстанавливается крепость горных пород. Для каждой разновидности горных пород, правильный выбор температурно-временного режима нагревания с помощью СВЧ-волн приводит к разупрочнению.

Результаты расчетного и экспериментального определения минимальной удельной энергоемкости разрушения, диорита Токтозанского месторождения и филлита Кумторского месторождения показаны на рис. 2 и 4. Достоверность полученных экспериментальных данных подтверждается также хорошей повторяемостью значений определяемых величин при испытании группы из девяти образцов.

Выводы

1. Определена энергоемкость разрушения диорита (Токтозанского месторождения) и филлита (Кумтор) в зависимости от температуры при воздействии СВЧ-волн разной продолжительности. Наибольшая энергоемкость отмечена после одной минуты облучения, когда температура диорита и филлита достигала соответственно 128 и 31 градусов по Цельсию, наименьшая – после трех минут облучения при температуре соответственно 566 и 356 градусов. Дальнейшее увеличение времени облучения приводило к увеличению температуры нагрева пород и возрастанию энергоемкости разрушения.

2. Выявлено, что разупрочнение породы происходит в течение первых трех минут облучения, а затем, при более длительном воздействии облучения, упругие характеристики стабилизируются и возникает упрочнение породы.

Список литературы

1. Явтушенко О.В., Коробской О.В. Исследование воздействия СВЧ-энергии на некоторые горные породы // Механика и разрушение горных пород. Ч. 4. Киев, 1976. С. 142–144.

2. Трубецкой К.И., Викторов С.Д. Физические проблемы разрушения горных пород. М., 2014. 260 с.

3. Под редакцией Э. Окресса Применение энергии СВЧ в производстве. М.: Наука, 2010. 345 с.

4. Елисеев В.В. Механика деформируемого твёрдого тела. СПб., 2006. 260 с.

5. Султаналиева Р.М. Принципы целенаправленного изменения механических свойств руд и минералов: монография. Бишкек, 2014. 153 с.

6. Султаналиева Р.М., Конушбаева А.Т. Определение температуры разупрочнения крепких руд от времени воздействия СВЧ-волн // Новая наука: теоретический и практический взгляд: материалы международной научно-практической конфер. Нижний Новгород, 2016. С. 21–25.

7. Горная энциклопедия. М.: Издательство «МИФ», 2010. 350 с.

8. Дьяконов В.П. MATLAB 6. Учебный курс. СПб.: Питер, 2011. С.180.

9. Конушбаева А.Т. Влияние электромагнитных полей сверхвысоких частот на характеристики разрушения крепких горных пород. автореф. дис. … канд. физ.-мат. наук. Бишкек, 2019. 30 с.