

УДК 622.023

**РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ИЗМЕНЕНИЯ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ РУД
ОТ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НИХ СВЧ-ВОЛНАМИ**

К.Т. Тажибаев, Р.М. Султаналиева

Приведены результаты теоретических исследований изменения энергоемкости измельчения руд от длительности воздействия на них СВЧ-волнами. Обоснована формула, позволяющая определять значения удельной энергоемкости измельчения руды и их изменений от продолжительности воздействия СВЧ-волн и от температуры

Ключевые слова: измельчение; руда; энергоемкость; температура; волна; остаточные напряжения.

**RESULTS OF ANALYTICAL RESEARCHES OF CHANGE
OF POWER CONSUMPTION OF CRUSHING OF ORES FROM DURATION
OF INFLUENCE FOR THEM THE MICROWAVE OVEN WAVES**

K.T. Tazhibaev, R.M. Sultanalieva

Results of theoretical researches of change of power consumption of crushing of ores from duration of influence for them the microwave oven waves are resulted. The formula is proved, allowing to define values specific power consumption of ore and their changes from duration of influence of the microwave oven of waves and from temperature.

Key words: crushing; ore; power consumption; temperature; wave; residual stress.

Эффективность разупрочнения крепких руд и минералов с помощью СВЧ-волн заключается в интенсивности передачи энергии электромагнитных волн в виде неоднородного теплового воздействия на указанные твердые среды за относительно короткое время (минуты), что обуславливает существенное изменение структурного состояния и показателей прочности указанных сред. Разрушение твердых сред осуществляется двумя путями – отрывом (разрыв, растяжение) или сдвигом. Для горных пород характерно неравенство прочностей при различных видах нагружения:

$$\sigma_0 > \sigma_{сж} > \tau_c > \sigma_p, \quad (1)$$

где σ_0 – прочность при объемном (трехосном) сжатии;

$\sigma_{сж}$ – прочность при одноосном сжатии;

τ_c – прочность при срезе (сдвиг);

σ_p – прочность при одноосном растяжении.

Хрупкость и пластичность (вязкость) горных пород существенно влияют на энергоемкость их разрушения. В качестве показателя – коэффициента хрупкости K_{xp} горной породы предложено от-

ношение прочности при одноосном сжатии к прочности при одноосном растяжении [1] $K_{xp} = \frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p}$.

Обратную к показателю хрупкости величину назовем коэффициентом (показателем) сопротивляемости разрушению горной породы $K_s = \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}}$.

Для определения изменений удельной энергоемкости измельчения (по сравнению с удельной энергоемкостью измельчения исходного состояния) от продолжительности СВЧ воздействия на горные породы (руды) запишем

$$E_v = E_{v0} + E_{v0} \cdot K_s, \quad (2)$$

где E_v – удельная энергоемкость измельчения после СВЧ облучения;

E_{v0} – удельная энергоемкость измельчения до СВЧ облучения (исходного состояния);

K_s – коэффициент энергоемкости разрушения горной породы, зависящий от разности показателя напряженности и коэффициента сопротивляемости разрушению.

Например, при превышении показателя напряженности σ коэффициента сопротивляемости породы разрушению $\frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}}$, коэффициент K_s имеет отрицательный знак, и удельная энергоемкость измельчения E_v уменьшается по сравнению с удельной энергоемкостью измельчения до СВЧ облучения (исходного состояния).

Разрушение горной породы при одноосном и трехосном сжатии происходит в результате комбинации элементарных отрывов и сдвигов в границах и внутри зерен [2].

Изменение удельной энергоемкости измельчения горных пород (руд) зависит от остаточного напряжения σ_o и показателя сопротивляемости породы разрушению $\frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}}$.

$$\text{Исходя из этого запишем: } K_s = \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{3 \cdot |\sigma_o|}{\sigma_{сж}} \quad (3),$$

$$\text{тогда } E_v = E_{vo} + E_{vo} \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{3 \cdot |\sigma_o|}{\sigma_{сж}} \right) \quad (4),$$

$$\text{или } E_v = E_{vo} \left[1 + \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{3 \cdot |\sigma_o|}{\sigma_{сж}} \right) \right] \quad (5)$$

где $|\sigma_o|$ – абсолютное среднее значение остаточного напряжения, зависящее от температуры.

Известно, что при неравномерном температурном воздействии изменяется структурное состояние, в том числе остаточные (структурные) напряжения горных пород и минералов [3].

Известно также, что остаточные напряжения в зависимости от их знака: растягивающие (знак +), сжимающие (знак –) влияют на прочность поразному. В первом случае как разупрочняющий, а во втором – как упрочняющий фактор. Например, для режущих металлических инструментов с целью их упрочнения формируют вблизи поверхности сжимающие остаточные напряжения путем термической закалки этих инструментов. Уровень температуры и режимы температурного влияния на остаточные напряжения в горных породах изучены недостаточно. Естественно, что при достижении температуры разложения (деструкции) остаточные напряжения разгружаются. Эксперименты показали, что после нагревания и последующем медленном охлаждении (режим отжига) остаточные напряжения всех видов разгружаются, при невысоких температурах – в диапазоне 100–400 °С и – последующем быстром охлаждении (в воздухе) формируются преимущественно растягивающие остаточные напряжения, тогда как при более высоких температурах и быстром охлаждении – сжимающие. При определенной температуре нагрева возможны пре-

образования растягивающих остаточных напряжений в сжимающие и наоборот.

Для определения средней величины остаточных напряжений, формируемых в объеме горной породы при тепловом воздействии СВЧ-волнами с последующим охлаждением в воздухе, получена

$$\text{следующая формула: } \sigma_o = \left(\frac{T_m}{T_p} \mp \frac{T_2}{T_m} \right) 2\sigma_p \quad (6)$$

где σ_o – среднее остаточное напряжение в объеме горной породы; T_m – температура, при которой удельная энергоемкость измельчения горной породы минимальна, т. е., температура изменения знака остаточных напряжений, например, растягивающие напряжения, переходят в сжимающие; T_2 – температура для соответствующей продолжительности воздействия СВЧ-волн (t); T_p – температура разложения (деструкции) основного минерала или горной породы; σ_p – прочность горной породы при одноосном растяжении.

В формуле (6) знак плюс (+) при $T_m \geq T_2$, при этом формируются преимущественно растягивающие остаточные напряжения, знак минус (–) при $T_m < T_2$, при этом формируются преимущественно сжимающие остаточные напряжения.

По формуле (4) определяем удельную энергоемкость измельчения темносерого филлита месторождения Кумтор с продолжительностью воздействия СВЧ-волнами равном 1-ой минуте. Для этого вначале по формуле (6) определяем остаточное напряжение для температуры, соответствующей для 1-й минуты СВЧ облучения. Температура разложения основного порообразующего минерала кальцита $T_p=900$ °С (таблица 2), прочность при одноосном растяжении филлита $\sigma_p=56$ кГс/см² (таблица 1). Экспериментально установлено, что при трехминутном СВЧ-облучении удельная энергоемкость измельчения филлита имеет минимальное значение и составляет $T_m=356$ °С, а при одноминутном СВЧ-облучении $T_m=31$ °С, следовательно, по формуле (6) имеем:

$$\sigma_o = \left(\frac{T_m}{T_p} + \frac{T_2}{T_m} \right) 2\sigma_p = \left(\frac{356}{900} + \frac{31}{356} \right) 56 \cdot 2 = \\ = (0,396 + 0,0871) \cdot 112 = 54 \text{ кГс} / \text{см}^2$$

С учетом найденного значения остаточного напряжения по формуле (4) определяем удельную энергоемкость измельчения темносерого филлита с одноминутным воздействием СВЧ-волнами. Для этого минерала удельная энергоемкость измельчения исходного (начального) состояния $E_{vo} = 97$ Дж/см³, прочность при одноосном сжатии $\sigma_{сж} = 1112$ кГс / см² (таблица 1), тогда

Таблица 1 – Механические характеристики горных пород

Название и место отбора горной породы, минерала	Плотность ρ , г/см ³	Прочность при одноосном сжатии $\sigma_{сж}$, МПа	Прочность при одноосном растяжении σ_p , МПа
Известняк, Ак-Татыр	2,7; 2,72; 2,68; 2,72; 2,71	896; 1041; 966; 820	45;53;52;48,2; 40,9;
Среднее значение	2,71	931	48
Гранодиорит, Токтозан	2,68; 2,69; 2,69; 2,73; 2,71; 2,68	1145; 1177; 1145; 1138	70; 81;77;70;91; 76;70;80
Среднее значение	2,7	1151	77
Филлит темносерый, Кумтор	2,97; 3,13; 2,99; 2,91; 3,0	961;1255; 1045; 1185	48; 63; 52; 60
Среднее значение	3,0	1112	56
Кварц, Восточный-Коунрад	2,62; 2,65; 2,68; 2,65; 2,64	1824; 1765; 1674; 1740; 1745	54; 59; 61;56; 63; 66; 62
Среднее значение	2,65	1750	60

$$E_v = E_{v0} + E_{v0} \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{3 \cdot |\sigma_o|}{\sigma_{сж}} \right) =$$

$$= 97 + 97 \left(\frac{56}{1112} - \frac{3 \cdot |54|}{1112} \right) =$$

$$97 + 97(0,05 - 0,1457) =$$

$$= 97 - 9,3 = 87,7 \text{ Дж/см}^3.$$

Для двухминутного воздействия СВЧ-волн имеем:

$$\sigma_o = \left(\frac{T_m}{T_p} + \frac{T_2}{T_m} \right) 2\sigma_p =$$

$$= \left(\frac{356}{900} + \frac{222}{356} \right) 56 \cdot 2 =$$

$$= (0,396 + 0,6236) \cdot 112 =$$

$$= 114,2 \left(\frac{356}{900} + \frac{222}{356} \right) 56 \cdot 2 =$$

$$= (0,396 + 0,6236) \cdot 112 =$$

$$= 114,2 \text{ кгс / см}^2;$$

$$E_v = E_{v0} + E_{v0} \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{3 \cdot |\sigma_o|}{\sigma_{сж}} \right) =$$

$$= 97 + 97 \left(\frac{56}{1112} - \frac{3 \cdot |114,2|}{1112} \right) =$$

$$= 97 + 97(0,05 - 0,308) =$$

$$= 97 - 25 = 72 \text{ Дж/см}^3.$$

Для трехминутного воздействия СВЧ-волн аналогично получим $E_v = 61$ Дж/см³; для 4-х минут – $E_v = 77$ Дж/см³; для 5 минут – $E_v = 70$ Дж/см³; для 6 минут – $E_v = 64,4$ Дж/см³; для 7 минут – $E_v = 60$ Дж/см³; для 8 минут – $E_v = 58$ Дж/см³.

На рисунке 1 представлены результаты аналитического и экспериментального определения удельной энергоёмкости измельчения филлита Кумторского месторождения. Сравнение результатов показывает хорошую сходимость и согласованность экспериментальных и аналитических данных.

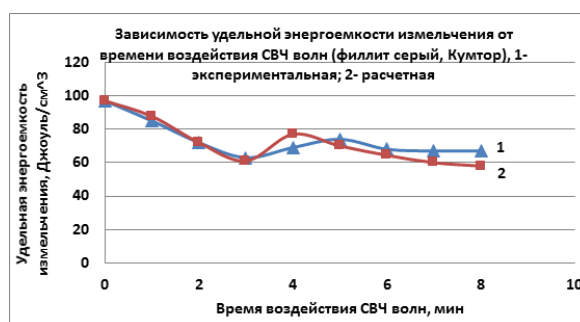


Рисунок 1 – Экспериментальное (1) и аналитическое (2) определение удельной энергоёмкости измельчения филлита Кумторского месторождения

По формуле (4) определяем удельную энергоёмкость измельчения кварца Восточно-Коунрадского месторождения для одноминутного воздействия СВЧ-волнами. Для этого, вначале по формуле (6) определяем остаточное напряжение для температуры, соответствующей одноминутному СВЧ-облучению. Температура разложения кварца $T_p = 1470$ °С (таблица 2), прочность при одноосном растяжении кварца Восточно-Коунрадского месторождения – $\sigma_p = 60$ кгс/см² (таблица 1). Экспериментально установлено, что при пятиминутном СВЧ-облучении удельная энергоёмкость измельчения этого минерала имеет минимальное значение и при этом согласно расчетам $T_m = 702$ °С,

Таблица 2 – Температуры фазового перехода некоторых минералов [2]

Название минерала	Температура плавления (фазового перехода) $T_{пл}$, °C	Температура разложения T_p , °C
Галит (NaCl)	800	
Кварц (SiO ₂)	1600–1670	1470
Гематит (Fe ₂ O ₃)	1400–1560	1360
Кальцит (CaCO ₃)	1750	900

Таблица 3 – Экспериментальные и расчетные значения удельной энергоёмкости измельчения для разного времени воздействия СВЧ-волнами

Название и место отбора горной породы, минерала	Продолжительность возд. СВЧ-волн, минут	Удельная энергоёмкость измельчения, Дж/см ³		Отклонение расчетных значений от экспериментальных, %
		Экспериментальное значение	Расчетное значение	
Филлит темносерый, Кумтор	0 (исходн.)	97	97	0
	1	85	87,7	3,2
	2	72	72	0
	3	63	61	3,2
	4	69	77	11,6
	5	74	70	5,4
	6	68	64,4	5,3
	7	67	60	10,4
	8	67	58	13,4
Кварц, Восточный-Коунрад	0 (исходн.)	69	69	0
	1	66,7	62,7	6
	2	64,1	58	9,5
	3	61,9	55	11,14
	4	59,3	52	12,1
	5	58,2	50,4	13,4
	6	61,8	62,4	0,97
	7	66,3	61	8

а при одноминутном СВЧ-облучении – $T_p = 91$ °C, следовательно по формуле (6), имеем:

$$\sigma_o = \left(\frac{T_m}{T_p} + \frac{T_2}{T_m} \right) 2\sigma_p = \left(\frac{702}{1470} + \frac{91}{702} \right) 60 \cdot 2 = (0,4776 + 0,1296) \cdot 120 = 73 \text{ кГс} / \text{см}^2.$$

С учетом найденного значения остаточного напряжения по формуле (4) определяем удельную энергоёмкость измельчения кварца месторождения Восточный Коунрад, для одноминутного воздействия СВЧ-волнами. Удельная энергоёмкость измельчения исходного (начального) состояния $E_{v0} = 69$ Дж/см³, прочность при одноосном сжатии $\sigma_{сж} = 1750$ кГс/см² (таблица 1), тогда для одноминутного воздействия СВЧ-волнами имеем:

$$E_v = E_{v0} + E_{v0} \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{3 \cdot |\sigma_o|}{\sigma_{сж}} \right) = 69 + 69 \left(\frac{60}{1750} - \frac{3 \cdot |73|}{1750} \right) =$$

$$= 69 + 69(0,034 - 0,1251) = 69 - 6,3 = 62,7 \text{ Дж} / \text{см}^3.$$

Для двухминутного воздействия СВЧ-волнами имеем:

$$\sigma_o = \left(\frac{T_m}{T_p} + \frac{T_2}{T_m} \right) 2\sigma_p = \left(\frac{702}{1470} + \frac{320}{702} \right) 60 \cdot 2 = (0,4776 + 0,4558) \cdot 120 = 112 \text{ кГс} / \text{см}^2;$$

$$E_v = E_{v0} + E_{v0} \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} - \frac{3 \cdot |\sigma_o|}{\sigma_{сж}} \right) =$$

$$= 69 + 69 \left(\frac{60}{1750} - \frac{3 \cdot |112|}{1750} \right) = 69 + 69(0,034 - 0,192) = 69 - 11 = 58 \text{ Дж} / \text{см}^3.$$

Для трехминутного воздействия СВЧ-волнами, по указанным формулам $E_v = 55$ Дж/см³; для 4-х минут – $E_v = 52$ Дж/см³; для 5-и минут –

$E_v = 50,4$ Дж/см³; для 6-и минут – $E_v = 62,4$ Дж/см³; для 7-и минут – $E_v = 61$ Дж/см³.

На рисунке 2 представлены результаты аналитического и экспериментального определения удельной энергоёмкости измельчения кварца Восточно – Коунрадского месторождения. Сравнение результатов показывает согласованность экспериментальных и аналитических данных.

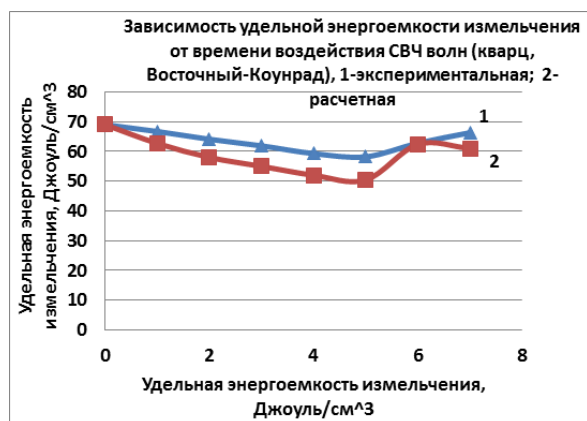


Рисунок 2 – Графики экспериментального (1) и аналитического (2) определения удельной энергоёмкости измельчения кварца Восточно Коунрадского месторождения

В таблице 3 в качестве примера приведены результаты аналитического и экспериментального определения величин удельной энергоёмкости измельчения для разного времени воздействия СВЧ-волнами. Как видно из таблицы, отклонение расчетных данных удельной энергоёмкости измельчения от экспериментальных значений составляет, в среднем 5–10 %.

Результаты экспериментальных и аналитических исследований показали, что при оптимальном времени воздействия СВЧ-волн (3–5) минут происходит существенное уменьшение энергоёмкости измельчения руд. Это существенно экономит энергозатраты [5]. Однако возникает закономерный вопрос сколько дополнительной энергии расходуется при СВЧ облучении, и не превысит ли суммарная энергоёмкость величину энергоёмкости исходного, то есть необлученного состояния? Для определения суммарной энергоёмкости измельчения руд необходимо определить удельную тепловую энергию в СВЧ печи. Тепловую энергию СВЧ печи можно определить по формуле $E_T = N \cdot t$, где E_T – тепловая энергия печи; N – мощность печи, Дж/с; t – время действия печи, с.

Например, при одноминутной продолжительности работы печи $E_T = N \cdot t = 700$ Дж/с · 60с = 42000 Дж.

Удельная объемная энергия определяется как $E_{TV} = E_T / V_{\text{э}}$, где $V_{\text{э}} = V_{\text{п}} \cdot K_3$ – эффективный объем печи; $V_{\text{п}}$ – полезный объем печи (30000см³); K_3 – коэффициент заполнения объема ($K_3 = 0,7$).

В нашем случае при одноминутной продолжительности работы печи $E_{TV} = E_T / V_{\text{п}} = 42000$ Дж/30000 · 0,7 см³ = 2 Дж/см³; при 2 минуты – 4 Дж/см³; 3 минуты – 6 Дж/см³; 4 минуты – 8 Дж/см³; 5 минут – 10 Дж/см³; 6 минут – 12 Дж/см³; 7 минут – 14 Дж/см³; 8 минут – 16 Дж/см³; 9 минут – 18 Дж/см³; 10 минут – 20 Дж/см³.

С учетом дополнительной удельной энергии СВЧ облучения можно определить суммарную энергоёмкость измельчения руд для разной продолжительности СВЧ воздействия и сравнить с величиной энергоёмкости измельчения исходного, необлученного состояния. На рисунке 3 представлены графики экспериментальной и суммарной энергоёмкости измельчения известняка месторождения Ак-Татыр.

Как видно на рисунке 3 суммарная удельная энергоёмкость измельчения руд не превышает величину удельной энергоёмкости измельчения исходного, не облученного СВЧ-волнами состояния. Таким образом, можно отметить, что при оптимальной продолжительности СВЧ облучения перед измельчением крепких руд и минералов обеспечивается значительная экономия энергоресурсов.

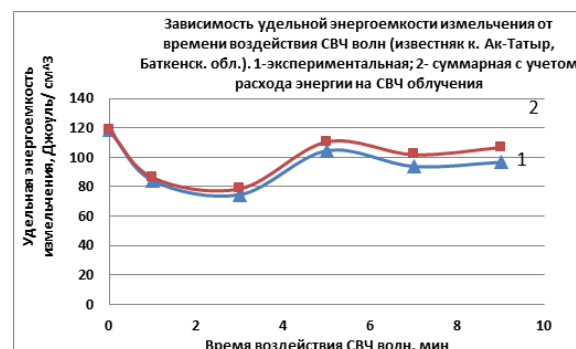


Рисунок 3 – Удельная энергоёмкость измельчения (известняк, Ак-Татыр, 1 – экспериментальная, 2 – суммарная)

На основании результатов исследований можно сделать следующие выводы:

1. Установлено переломное время воздействия СВЧ-волн и характерная для данной горной породы температура, при которой реализуется эффективное измельчение руд и минералов, достигается минимум энергоёмкости их измельчения.
2. Для определения изменений удельной энергоёмкостью измельчения (по сравнению с удельной энергоёмкостью измельчения исходного состояния) от продолжительности воздействия СВЧ-

волн на горные породы (руды) получена формула, которая описывает изменение данного показателя от продолжительности воздействия СВЧ-волн, и от температуры.

3. Получена эмпирическая формула для определения средней величины остаточных напряжений формируемых в объеме горной породы, при тепловом воздействии СВЧ-волнами с последующим охлаждением в воздухе.

Литература

1. *Ильницкая Е.И. и др.* Свойства горных пород и методы их определения / Е.И. Ильницкая и др. М.: Недра, 1969. 452 с.
2. *Тажобаев К.Т.* Деформация и разрушение горных пород / К.Т. Тажибаев. Фрунзе: Илим, 1986. 106 с.
3. *Зильбершмидт М.Т.* Механизм изменения структурного состояния горных пород при внешнем воздействии // Физические процессы в горных породах: матер. всес. конф. М., 1984.
4. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород / под ред. Н.В. Мельникова, В.В. Ржевского, М.М. Протодяконова М.: Недра, 1975. 279 с.
5. Патент Кыргызской Республики: №1503. Способ измельчения руд и минералов / К.Т. Тажибаев, Р.М. Султаналиева, М.С. Акматалиева, Д.К. Тажибаев; зарег. в Государственном реестре изобретений Кыргызской Республики 31.10. 2012 г.