

УДК 622.023.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ
ТЕМПЕРАТУРЫ РУД ОТ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ВРЕМЕНИ
ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НИХ СВЧ-ВОЛНАМИ**

К.Т. Тажибаев, Р.М. Султаналиева

Представлены результаты исследования закономерности изменения температуры руд и минералов кварца от продолжительности времени воздействия на них СВЧ-волнами, обоснована формула зависимости удельной теплоемкости горных пород от продолжительности воздействия СВЧ-волн.

Ключевые слова: температура; руда; минерал; теплоемкость; волна.

**RESULTS OF INVESTIGATION OF LAW OF CHANGE
OF TEMPERATURE OF ORES FROM DURATION OF TIME
OF INFLUENCE ON THEM THE MICROWAVE OVEN WAVES**

K.T. Tazhibaev, R.M. Sultanalieva

It is presented the results of investigation of law of change of temperature of ores and mineral of quartz from duration of time of influence on them the microwave oven waves, the formula of dependence of specific heat capacity of rocks from duration of influence of the microwave oven of waves is proved.

Key words: temperature; ore; mineral; heat capacity; wave.

В настоящее время признано, что для эффективного разупрочнения и уменьшения энергоемкости измельчения крепких руд наиболее перспективны способы, основанные на воздействии на них электромагнитным полем сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона.

Сущность предлагаемого нами способа измельчения руд [1] заключается в том, что по данным определения удельной энергоемкости измельчения для исходного состояния (не подвергнутых воздействию), и для разных величин длительности СВЧ воздействия (рисунок 1), определяют оптимальное значение продолжительности времени воздействия СВЧ-волн, соответствующее минимальному значению удельной энергоемкости измельчения данной руды.

Для облучения руд и минералов использовалась СВЧ-печь (микроволновая печь). В печи электричество преобразуется для генерации микроволновой энергии. Микроволны проникают в зону воздействия через отверстия внутри печи и не могут проникать через металлические стенки печи. В микроволновой печи можно выбирать 5 уровней микроволновой мощности. Нами использовался уро-

вень мощности – 700 Вт. Частота микроволн – 2450 МГц. Полезный объем печи составляет 0,03 м³. Образцы руд навесками по 200–250 г и средними размерами 20–25 мм помещались вовнутрь печи и облучались СВЧ-импульсами. Продолжительность воздействия СВЧ-волнами составляла от 1 до 12 минут. В зависимости от руды и минерала исследуемые навески подвергались облучению

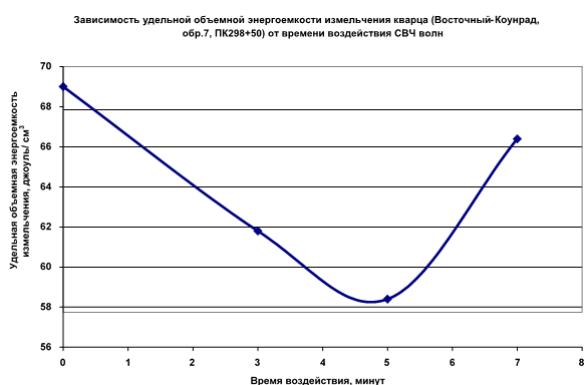


Рисунок 1 – Зависимость энергоемкости измельчения от времени воздействия СВЧ-волн (кварц, Восточный Коунрад)

СВЧ-волнами по следующим интервалам: 1; 3; 5; 7; 9 и 1–12 мин с интервалом 1 мин. Для каждого интервала времени СВЧ воздействия определялись удельная энергоёмкость измельчения руды или минерала.

Известно, что разрушение горных пород (руд) при воздействии на них СВЧ-волнами связано, прежде всего, с их нагревом, так как энергия СВЧ-поля поглощается породой и превращается в тепловую энергию. В зависимости от свойств при СВЧ облучении температура породы повышается на dT .

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

где P – мощность СВЧ поля, поглощаемая единицей объема породы;

t – время воздействие СВЧ поля; C – удельная теплоемкость породы;

ρ – плотность породы.

Подставляя $dT = T_2 - T_1$ и $P = \frac{N}{V}$ в формулу (1)

получим:

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

где V – объем навески породы; T_1 – первоначальная температура, K ;

T_2 – температура при исследуемой длительности нагрева в K ;

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 [2].

Для диорита с удельной теплоемкостью $C_0 = \frac{0,65 \text{ кДж}}{\text{кг} \cdot \text{Дж}}$ (таблица 5.1) в [3] и с учетом навески

(пробы) диорита месторождения Токтозан с размерами $2 \times 2 \times 2,5$ см; $\rho = 2700 \text{ кг/см}^3$;

$V = (2 \cdot 2 \cdot 2,5) \cdot n = (2 \cdot 2 \cdot 2,5) \cdot 5 = 50 \text{ см}^3$, где n – количество кусков, определим температуру нагрева руды для продолжительности действия СВЧ-волн $t = 40$ с по следующей формуле (3).

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

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

$$= \frac{28 \text{ кДж}}{0,088 \frac{\text{кДж}}{\text{К}}} = 318 \text{ К};$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 318 + 20 = 338 \text{ К}; \text{ или}$$

$$T_2 = 338 - 273 = 65 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Известно, что при повышении температуры повышается удельная теплоемкость горных пород [1–4].

Считают, что при температуре от 273 до 773 K (от 0 до 500 $^\circ\text{C}$) теплоемкость горных пород изменяется практически по линейному закону [4].

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 для соответствующей температуры;

C_0 – удельная теплоемкость исходного состояния (начальная, для комнатной температуры);

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) нами была получена следующая зависимость удельной теплоемкости горных пород:

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

где t_m – продолжительность СВЧ воздействия в минутах;

R_m – коэффициент размерности времени, 1 минут.

Формула (5) справедлива для температур от 0 до 1000 $^\circ\text{C}$, так как выше этой температуры в горных породах возможны процессы разложения.

Как показано 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 одномоментного воздействия СВЧ-волнами

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

с учетом данной теплоемкости данной руды для одномоментного воздействия СВЧ-волнами определяем по известной формуле (2) температуру нагре-

ва в зависимости от продолжительности воздействия волн:

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

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 381 + 20 = 401 \text{ К};$$

или $T_2 = 401 - 273 = 128^\circ\text{C}$.

Для двухминутного воздействия СВЧ-волнами удельная теплоемкость будет:

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

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

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 636 + 20 = 656 \text{ К};$$

или $T_2 = 656 - 273 = 383^\circ\text{C}$.

Для других значений продолжительности времени воздействия СВЧ-волн удельная теплоемкость и температура определены аналогично.

На рисунке 2 представлен график изменения температуры от продолжительности СВЧ воздействия для диорита месторождения Токтозан. Как видно на рисунке, выше 566°C , при дальнейшем увеличении времени воздействия СВЧ-волны, температура руды изменяется нелинейно.

Следует также отметить, что температура 566°C соответствует 3-минутному СВЧ воздействию и при этой продолжительности времени воздействия волн на данную руду обеспечивается минимальность удельной энергоемкости измельчения. Дальнейшее увеличение времени воздействия волн, наоборот, приводит к увеличению энергоемкости измельчения [5]. Таким образом, переломное время воздействия СВЧ-волн – 3 минуты, а следовательно температура 566°C может служить характеристикой для диорита Токтозанского месторождения, при которой реализуется эффективное измельчение.

Для темносерого филлита месторождения Кумтор принимаем исходную удельную теплоемкость $C_0 = \frac{0,79 \text{ кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ (таблица 1 сланцы) [2].

Таблица 1 – Удельная теплоемкость горных пород рудных месторождений [3].

Название горной породы	Удельная теплоемкость, $C_0 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
Диабаз	0,77
Кварцит	0,72-0,85
Кварцито-песчаник	0,79
Сидерит	0,7-0,73
Магнетит	0,5-0,6
Скарн гранат магнетитовый	0,68-0,74
Карбонат кальцитовый	0,34
Известняк	0,45
Карбонат доломитовый	0,98
Сланцы окварцованные	0,79
Гранит	0,87-0,6
Известняк	0,9-1
Гранодиорит	0,65
Песчаник	0,78
Мрамор	0,6-0,9
Гранит	0,73
Апатит	0,7
Гипс	0,9-1
Гранит красный	0,8-0,9
Алевролит	0,8-0,9
Песчаник с известковым цементом	1,38

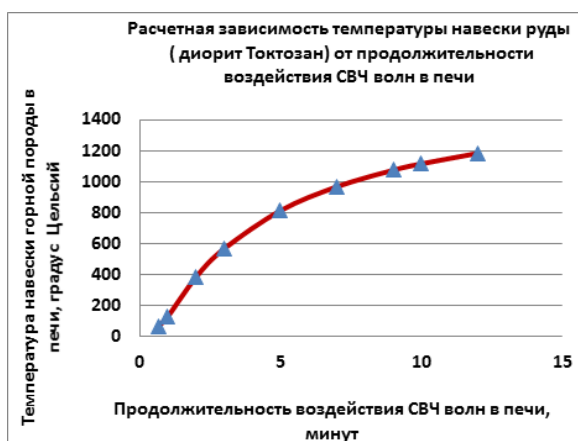


Рисунок 2 – График изменения температуры навески руды (диорит, Токтозан) от продолжительности воздействия СВЧ-волн

Для минутной продолжительности воздействия СВЧ-волн удельная теплоемкость составит:

$$C_T = C_0 \left(1 + \frac{t_m R_m}{4} \right) = 0,79 \left(1 + \frac{1}{4} \right) = 0,99 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

тогда

$$\Delta T = \frac{Nt}{C\rho V} = \frac{700 \text{ Дж} / \text{с} \cdot 60 \text{ с}}{\frac{0,99 \text{ кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 0,00005 \text{ м}^3 \cdot 3000 \text{ кг} / \text{м}^3} =$$

$$= \frac{42 \text{ кДж}}{0,148 \text{ кДж}} = 284 \text{ К};$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 284 + 20 = 304 \text{ К};$$

или $T_2 = 304 - 273 = 31^\circ\text{C}$.

Для двухминутного воздействия СВЧ-волн имеем:

$$C_T = 0,79 \left(1 + \frac{2}{4}\right) = 1,18 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \text{ тогда}$$

$$\Delta T = \frac{Nt}{C\rho V} = \frac{700 \text{ Дж} / \text{с} \cdot 120 \text{ с}}{\frac{1,18 \text{ кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 0,00005 \text{ м}^3 \cdot 3000 \text{ кг} / \text{м}^3} =$$

$$= \frac{84 \text{ кДж}}{0,177 \text{ кДж}} = 475 \text{ К};$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 475 + 20 = 495 \text{ К};$$

или $T_2 = 495 - 273 = 222^\circ\text{C}$.

Для всех других значений продолжительности времени воздействия СВЧ-волн удельная теплоемкость, и температура определены аналогично.

На рисунке 3 представлен график изменения температуры от продолжительности СВЧ воздействия для темносерого филлита месторождения Кумтор. Как видно на рисунке температура руды выше 350°C от продолжительности СВЧ воздействия изменяется нелинейно. В данном случае температура 350°C соответствует 3-минутному СВЧ воздействию и при этом времени воздействия волн на данную руду удельная энергоемкость измельчения минимальная [5]. Следовательно, температура 350°C может служить характеристикой для темносерого филлита месторождения Кумтор, так как при этой температуре реализуется эффективное измельчение руды. Согласованность результатов определения температуры по формуле (5) с экспериментальными результатами энергоемкости измельчения свидетельствует о правомерности данной формулы.

Для кварца удельная теплоемкость при нормальных условиях, т.е. $C_0 = 0,74 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ [4], плотность $2650 \text{ кг} / \text{м}^3$. На основе формулы (5) определим теплоемкость кварца (Восточный Коунрад), а по формуле (2) – температуру нагрева для одноминутного воздействия СВЧ-волнами.

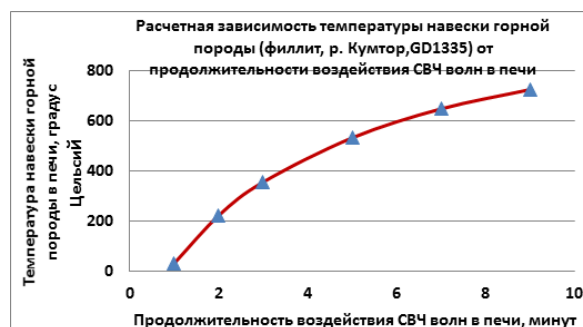


Рисунок 3 – График изменения температуры навески руды (темносерый филлит, Кумтор) от продолжительности воздействия СВЧ-волн

$$C_T = C_0 \left(1 + \frac{t_m R_m}{4}\right) = 0,74 \left(1 + \frac{1}{4}\right) = 1,665 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

тогда

$$\Delta T = \frac{Nt}{C\rho V} = \frac{700 \text{ Дж} / \text{с} \cdot 60 \text{ с}}{\frac{0,925 \text{ кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 0,00005 \text{ м}^3 \cdot 2650 \text{ кг} / \text{м}^3} =$$

$$= \frac{42 \text{ кДж}}{0,1221 \text{ кДж}} = 344 \text{ К};$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 344 + 20 = 364 \text{ К};$$

или $T_2 = 364 - 273 = 91^\circ\text{C}$.

Для двухминутного воздействия СВЧ-волнами имеем:

$$C_T = 0,74 \left(1 + \frac{2}{4}\right) = 1,11 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \text{ тогда}$$

$$\Delta T = \frac{Nt}{C\rho V} = \frac{700 \text{ Дж} / \text{с} \cdot 120 \text{ с}}{\frac{0,11 \text{ кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 0,00005 \text{ м}^3 \cdot 2650 \text{ кг} / \text{м}^3} =$$

$$= \frac{84 \text{ кДж}}{0,1465 \text{ кДж}} = 573 \text{ К};$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 573 + 20 = 593 \text{ К};$$

или $T_2 = 593 - 273 = 320^\circ\text{C}$.

Для всех других значений продолжительности времени воздействия СВЧ-волн удельная теплоемкость и температура определены аналогично.

Для известняков значение удельной теплоемкости колеблется в широких пределах (таблица 1)

[3]: 0,45; 0,75; 0,9 – $1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$. Для известняка Ак-

Татыр принимаем среднее значение удельной теплоемкости, то есть $C_0 = 0,775$. Плотность данной породы $2710 \text{ кг} / \text{м}^3$. На основе формулы (5) определим теплоемкость известняка (Ак-Татыр) для

одноминутного воздействия СВЧ-волнами, а по формуле (2) – температуру нагрева:

$$C_T = C_0 \left(1 + \frac{t_m R_m}{4} \right) = 0,775 \left(1 + \frac{1}{4} \right) = 0,968 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

тогда

$$\Delta T = \frac{Nt}{C \rho V} = \frac{700 \text{ Дж} / \text{с} \cdot 60 \text{ с}}{\frac{0,968 \text{ кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 0,00005 \text{ м}^3 \cdot 2710 \text{ кг} / \text{м}^3} =$$

$$= \frac{42 \text{ кДж}}{0,127 \text{ кДж}} = 331 \text{ К};$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 331 + 20 = 351 \text{ К};$$

$$\text{или } T_2 = 351 - 273 = 78^\circ \text{C}.$$

Для двухминутного воздействия СВЧ-волнами имеем:

$$C_T = 0,775 \left(1 + \frac{2}{4} \right) = 1,16 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \text{ тогда}$$

$$\Delta T = \frac{Nt}{C \rho V} = \frac{700 \text{ Дж} / \text{с} \cdot 120 \text{ с}}{\frac{1,16 \text{ кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 0,00005 \text{ м}^3 \cdot 2710 \text{ кг} / \text{м}^3} =$$

$$= \frac{84 \text{ кДж}}{0,15 \text{ кДж}} = 560 \text{ К};$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 560 + 20 = 580 \text{ К};$$

$$\text{или } T_2 = 580 - 273 = 307^\circ \text{C}.$$

Для трехминутного воздействия СВЧ-волнами имеем:

$$C_T = 0,775 \left(1 + \frac{3}{4} \right) = 1,356 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \text{ тогда}$$

$$\Delta T = \frac{Nt}{C \rho V} = \frac{700 \text{ Дж} / \text{с} \cdot 180 \text{ с}}{\frac{1,356 \text{ кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 0,00005 \text{ м}^3 \cdot 2710 \text{ кг} / \text{м}^3} =$$

$$= \frac{126 \text{ кДж}}{0,1779 \text{ кДж}} = 708 \text{ К};$$

$$T_2 = \Delta T + T_1 = 708 + 20 = 728 \text{ К};$$

$$\text{или } T_2 = 728 - 273 = 455^\circ \text{C}.$$

Далее для других значений продолжительности времени воздействия СВЧ-волн удельная теплоемкость, и температура определяем аналогично.

На рисунках 4 и 5 представлены графики изменения температуры от продолжительности СВЧ воздействия для кварца месторождения Восточный – Коунрад и известняка месторождения Ак-Татыр.

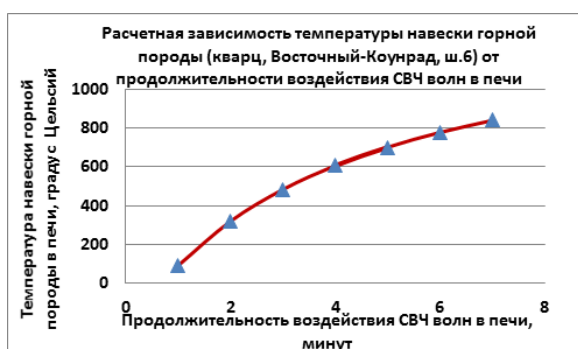


Рисунок 4 – Изменение температуры навески руды (кварц, Восточный Коунрад) от продолжительности воздействия СВЧ-волн

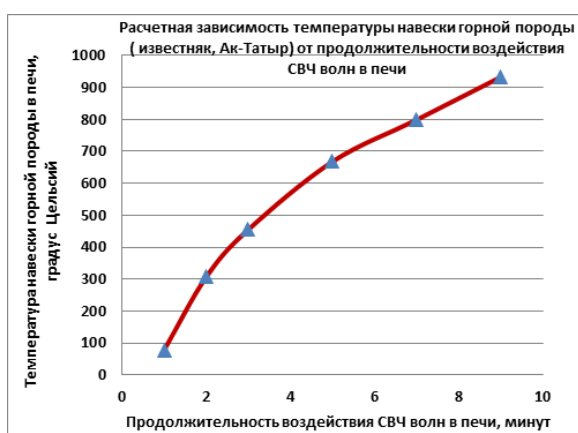


Рисунок 5 – Изменение температуры навески руды (известняк, Ак-Татыр) от продолжительности воздействия СВЧ-волн

Следует отметить, что графики изменения температуры навески руды или минерала от продолжительности воздействия СВЧ-волн в дальнейшем будут использоваться для определения среднего значения остаточного напряжения и оптимального времени воздействия СВЧ-волн.

Таким образом установлено, что при увеличении продолжительности действия СВЧ-волн более 1 мин, температура горной породы повышается не строго по линейному закону, и поэтому необходимо определить графики зависимости температуры от продолжительности воздействия СВЧ-волн для каждой разновидности руды и минерала.

На основе экспериментальных и аналитических исследований получена формула зависимости удельной теплоемкости горных пород от продолжительности воздействия СВЧ-волн, которая позволяет определять их температуру.

Графики изменения температуры от продолжительности СВЧ воздействия на горные породы

свидетельствуют о том, что при увеличении времени воздействия этих волн температура изменяется нелинейно.

Литература

1. 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.
2. *Диденко А.Н.* СВЧ-энергетика / А.Н. Диденко, Б.В. Зверев. М.: Наука, 2000. 264 с.
3. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород / под ред. Н.В. Мельникова, В.В. Ржевского, М.М. Протодяконова. М.: Недра, 1975. 279 с.
4. *Дмитриев А.П.* Термодинамические процессы в горных породах: учеб. для вузов / А.П. Дмитриев, С.А. Гончаров. М.: Недра, 1990. 360 с.
5. *Тажибаев К.Т.* Метод оптимального разупрочнения и измельчения крепких руд и минералов / К.Т. Тажибаев, Р.М. Султаналиева, М.С. Акматалиева, Д.К. Тажибаев // Известия КГТУ им. И. Раззакова. 2013. № 29. С. 303–310.