

6-7-2019

## MODELING OF THE HEATING PROCESSES, MELTING OF MATERIALS ON A BIG SUNNY FURNACE

M S. Paizullakhanov

*Institute of Materials Science, SA "Physics-Sun" Academy of Sciences of Uzbekistan*

Sh D. Paiziev

*Academy of Sciences of Uzbekistan Institute of Ion-plasma and laser technology*

S Kh Suleimanov

*Institute of Materials Science, SA "Physics-Sun" Academy of Sciences of Uzbekistan*

Follow this and additional works at: <https://uzjournals.edu.uz/ferpi>

---

### Recommended Citation

Paizullakhanov, M S.; Paiziev, Sh D.; and Suleimanov, S Kh (2019) "MODELING OF THE HEATING PROCESSES, MELTING OF MATERIALS ON A BIG SUNNY FURNACE," *Scientific-technical journal*: Vol. 2 : Iss. 2 , Article 2.

Available at: <https://uzjournals.edu.uz/ferpi/vol2/iss2/2>

This Article is brought to you for free and open access by 2030 Uzbekistan Research Online. It has been accepted for inclusion in Scientific-technical journal by an authorized editor of 2030 Uzbekistan Research Online. For more information, please contact [sh.erkinov@edu.uz](mailto:sh.erkinov@edu.uz).

## FUNDAMENTAL SCIENCES

## MODELING OF THE HEATING PROCESSES, MELTING OF MATERIALS ON A BIG SUNNY FURNACE

<sup>1</sup>M.S. Paizullakhanov, <sup>2</sup>Sh.D. Paiziev, <sup>1</sup>S.Kh. Suleimanov<sup>1</sup>Institute of Materials Science, SA “Physics-Sun” Academy of Sciences of Uzbekistan<sup>2</sup>Academy of Sciences of Uzbekistan Institute of Ion-plasma and laser technology

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАГРЕВА, ПЛАВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ НА БОЛЬШОЙ СОЛНЕЧНОЙ ПЕЧИ

<sup>1</sup>М.С. Пайзуллаханов, <sup>2</sup>Ш.Д. Пайзиев, <sup>1</sup>С.Х. Сулейманов<sup>1</sup>Институт Материаловедения «НПО «Физика-Солнце» АН РУз, г.Ташкент, ул. Бодомзор йули 2-Б.,<sup>2</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, г. Ташкент, Академгородок,

## КАТТА ҚУЁШ ҚУРИЛМАСИДА МАТЕРИАЛЛАРНИ ҚИЗДИРИШ, ЭРИТИШ ЖАРАЁНЛАРИНИ МОДЕЛЛАШ

<sup>1</sup>М.С. Пайзуллаханов, <sup>2</sup>Ш.Д. Пайзиев, <sup>1</sup>С.Х. Сулейманов<sup>1</sup>ЎзР. ФА. Физика-қуёш» ИИЧБ материалшунослик институти,<sup>2</sup>ЎзР. ФА. Ион-плазма ва лазер технологиялари институти

**Abstract.** The possibilities of calculating the rate of heating and cooling of molten materials on the example of pyroxene rocks under the influence of concentrated solar radiation in the Great Solar Furnace are shown. The dependences of the microstructure of the material obtained from the cooled melt on the cooling rate of the melt are analyzed. It is shown that a different method of cooling the melt can achieve different cooling rates:  $10^2$ ;  $10^3$  and  $10^4$  degree/s.

**Key words:** heating, cooling, concentrated solar radiation, Big Solar Furnace, modeling.

**Аннотация.** Показаны возможности расчета скорости нагрева и охлаждения расплавленных материалов на примере пироксеновых пород под воздействием концентрированного солнечного излучения на Большой Солнечной Печи. Анализированы зависимости микроструктуры материала, полученного из охлажденного расплава от скорости охлаждения расплава. Показано, что выбирая метод охлаждения расплава можно достигать различные скорости охлаждения:  $10^2$ ;  $10^3$  и  $10^4$  град/с.

**Ключевые слова:** скорость нагрева, охлаждения, концентрированное солнечное излучение, Большая Солнечная Печь, моделирование.

**Аннотация.** Катта Қуёш Қурилмасида пироксен жинслари мисолида мужассамланган қуёш нурлари оқими таъсирида материалларни қиздириши ва эритилган ҳолатни совитиши тезликларини ҳисоблаш имкониятлари аниқланди. Эритилган ҳолатни тоблаш орқали олинган материаллар микроструктурасининг совитиши тезлигига боғлиқлиги таҳлил қилинди. Эритилган ҳолатни совитиши усулларини танлаб олиш билан турли катталикдаги совитиши тезлигини олиш мумкинлиги кўрсатилди:  $10^2$ ;  $10^3$  ва  $10^4$  град/с.

**Таянч сўзлар:** қиздириш, совитиш тезлиги, мужассамлаган қуёш нурлари оқими, Катта Қуёш Қурилмаси, моделлаш.

**Введение**

Свойства материалов сильно зависят от метода их синтеза и определяются взаимосвязью: «метод синтеза – морфология – свойства». В последнее время интенсивно

## FUNDAMENTAL SCIENCES

развивается область материаловедения, касающаяся закалки жидкого состояния с целью получения материалов с благоприятным сочетанием различных свойств.

Материалы, синтезированные из расплава, проявляют высокие значения механических и диэлектрических свойств, и тем самым широко применяются в различных отраслях экономики. Расплавы это состояние вещества при температурах выше температуре плавления. В отличие от обычных жидкостей структура расплавов содержит кристаллоподобные группировки –микрокристаллиты, строение которых связано со строением кристаллической фазы. Морфология таких группировок в расплаве сильно влияет на строение и свойства получаемого материала. В этом аспекте одним из основных технологических факторов, определяющих качество расплава, являются скорости нагрева вещества до температуры плавления и выше, а также скорости охлаждения расплава. Использование солнечных технологий позволяет в сотни раз увеличить скорость нагрева и получить структуру из кластеров определенного состава, применяя методы быстрой ( $10^3$  град/с) и сверхбыстрой ( $10^4$  град/с) закалки [1-6]. Таким образом, моделирование процессов нагрева и охлаждения материалов под воздействием концентрированного солнечного излучения представляют как научный, так и практический интерес.

В данной работе исследованы процессы нагрева и плавления материалов в потоке концентрированного солнечного излучения в фокальной зоне Большой Солнечной Печи, а также процессы охлаждения плавленого материала. Сделана попытка моделирования вышеуказанных процессов и результаты модельных расчетов сопоставлены с экспериментально полученными данными.

### Нагрев

В процессе облучения материала в поле концентрированного солнечного излучения поглощенная световая энергия переходит в тепловую и вызывает нагрев материала. Температура, до которой нагревается материал, зависит от длительности воздействия, плотности потока излучения, теплофизических свойств материала, геометрии образца и др. Коэффициент поглощения металлов  $\alpha$  имеет величину порядка  $10^5 \text{ см}^{-1}$  поэтому большая часть поглощенной энергии выделяется в слое толщиной  $\sim 1/\alpha \sim 10^{-5}$  см. Тепло из области воздействия излучения отводится за счет теплопроводности в стороны и в глубину материала и нагрев может протекать с высокой скоростью. Когда материал нагревается до температуры плавления, начинается процесс плавления, который требует дополнительных энергетических затрат (теплоты плавления). Граница жидкой фазы продвигается в глубь материала. В твердых телах (диэлектриках) перенос тепловой энергии осуществляется путем взаимодействия упругих волн (фононов). В проводниках перенос энергии в основном осуществляется путем диффузии свободных электронов. Процесс переноса теплоты путем теплопроводности возможен лишь тогда, когда в различных точках тела температура неодинакова. Поэтому передача теплоты за счет теплопроводности вещества сопровождается изменением температуры, как в пространстве, так и во времени. Удельная теплоемкость проявляется в способности материала накапливать тепло, поступающее от внешнего источника, пока не достигнуто состояние равновесия. Коэффициент же температуропроводности определяет скорость установления теплового равновесия в материале при мгновенном включении теплового источника.

Полное уравнение процесса нагрева запишем в виде

$$\frac{dT_s}{dt} = -\frac{\alpha}{c\rho d}(T_s - T_0) - \frac{\varepsilon\sigma_0}{c\rho d}(T_s^4 - T_0^4) + \frac{(1-R)}{c\rho d}E \quad (1)$$

где  $\alpha$ – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup> К);  $c$  - удельная теплоемкость Вт/кг\*К;  $\rho$ - плотность г/см<sup>3</sup>;  $d$  – толщина слоя, м;  $T_s$  - температура поверхности тела и  $T_0$  –температура окружающей среды, К;  $\varepsilon$  - степень черноты,

## FUNDAMENTAL SCIENCES

$\sigma_0$  - постоянная Стефана-Больцмана,  $E$  – плотность потока концентрированного солнечного излучения в единицах ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ );  $R$ - коэффициент отражения нагреваемого материала.

Первый член в этом уравнении обусловлен конвективным теплообменом, второй - соответствует потери тепла за счет теплового излучения, третий - обусловлен нагревом за счет поглощения солнечного излучения.

Таким образом нагрев состоит из трех процессов: нагрев до плавления; плавление, где средняя температура предполагается постоянной; нагрев жидкого материала.

Время плавления  $t_m$  определялось из условий:

$$\frac{dT_s}{dt} = 0, \text{ при } T_s = T_m, T_m\text{-температура плавления}$$

Поступающее тепло  $Q$  уравнивается с теплотой плавления  $Q_m$ , то есть

$$Q - Q_M = Q - \lambda m = Q - \lambda \rho S d = 0$$

$$Q = [(1 - R)E - \alpha (T_m - T_0) - \epsilon \sigma_0 (T_m^4 - T_0^4)] S t_m$$

$$t_m = \frac{\lambda \rho d}{[(1 - R)I_s - \alpha (T_m - T_0) - \beta (T_m^4 - T_0^4)]}$$

где,  $\lambda$ - удельная теплота плавления, Дж/кг;  $m$ - масса материала, кг;  $S$ - площадь поверхности поглощающей солнечное излучение,  $\text{м}^2$

Начальные условия для изучаемых материалов (пироксеновые породы) выбраны следующим образом.  $c=711 \text{ Вт}/\text{кг}\cdot\text{К}$ ,  $\rho=3,2 \text{ г}/\text{см}^3$ ;  $\alpha=100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $d:=0,05 \text{ м}$ ;  $T_0:=320 \text{ К}$ ;  $E=750 \text{ Вт}/\text{см}^2$ ;  $R=0.15$ ;  $T_m=1660 \text{ К}$ ;  $\lambda=4200 \text{ Вт}/\text{кг}$ .

Расчет проводили в программе MATLAB. На рис.1 приведена зависимость температуры от времени воздействия концентрированного потока солнечного излучения.

Из рис.1 видно, что кривая нагрева материала носит немонотонный характер и состоит из трех участков. В первом участке происходит нагрев материала в твердом состоянии до температуры плавления. Такой процесс длится в течение 80с, что соответствует скорости 1385 град/мин.

При нагревании всякого твердого вещества при достижении определенного значения температуры происходит превращение его в жидкость. Такое явление обусловлено тем, что при увеличении температуры тела скорость теплового движения его молекул возрастает, и атомы удаляются друг от друга на большие расстояния. Вследствие роста амплитуды колебаний атомов начинается разрушение кристаллической решетки – исчезает дальний порядок - твердое тело плавится. Процессу плавления соответствует второй участок на рис.1, и он протекает в течение порядка 100с, за которое устанавливается равновесное термодинамическое состояние жидкости. Третий участок соответствует нагреву жидкого материала. Такой процесс как видно из рис.1 выходит на насыщение, связанное с граничным значением плотности потока падающего солнечного излучения.

### Охлаждение

Фиксация аморфного состояния расплавов при закалке связано со скоростью охлаждения, на которую оказывают влияние такие параметры как условия теплопереноса, температура расплава, материал закалочной системы и т.д. Повышение скорости охлаждения и затвердевания при быстрой закалке расплава значительно улучшает структуру, качество и физико-механические свойства материалов. Одними из главных условий, определяющих

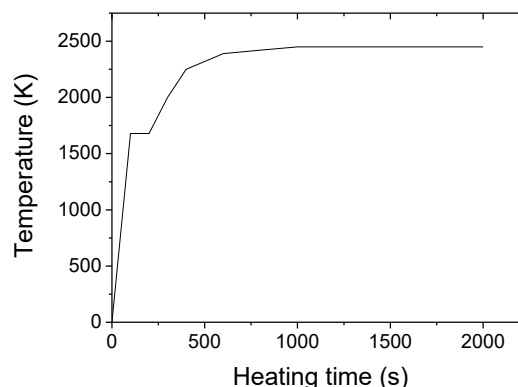


Рис.1. Зависимость температуры от времени воздействия концентрированного потока солнечного излучения.

## FUNDAMENTAL SCIENCES

скорость охлаждения ленты, являются: объем затвердевающего слоя расплава на поверхности охладителя, коэффициент теплопередачи на границе расплав-холодильник и время контакта охлаждаемого слоя расплава с подложкой. При этом скорость охлаждения в значительной степени зависит от распределения жидкой и твердой фаз, а также поля скоростей внутри охлаждаемого объема расплава до момента окончания процесса затвердевания.

Критическая скорость охлаждения  $V_c$  зависит от уровня термодинамических свойств материала и характером межчастичного взаимодействия. В зависимости от природы материала она варьирует в широких пределах (от  $10^2$ град/с для неорганических стекол и некоторых металлических расплавов до  $10^6$ - $10^8$ град/с для металлов). Достижение высоких скоростей охлаждения возможно при малой толщине охлаждаемого расплава и минимальном времени самого процесса закалки.

Охлаждение жидкого материала осуществили тремя методами.

- схлопыванием расплава по принципу «молот-наковальня» между водо-охлаждаемыми байками («хлопушка»), что позволило осуществлять закалку расплава с высокой скоростью.
- сбрасыванием капель жидкости в воду;
- охлаждением на водоохлаждаемой поверхности подложки.

Для описания процесса охлаждения воспользуемся законом Ньютона – Рихмана. В общем случае теплообмен расплава с окружающей средой осуществляется теплопроводностью, конвекцией и излучением.

Согласно закону Ньютона – Рихмана количество тепла, отдаваемое через поверхность тела  $S$  в единицу времени, пропорционально разности температур поверхности тела  $T_s$  и окружающей среды  $T_0$  ( $T_s > T_0$ ):

$$\frac{dQ}{dt} = -\alpha(T_s - T_0)S \quad (2)$$

Будем считать, что температура внутри капли распределена равномерно и, учитывая, что температура связана с количеством тепла

$$\Delta Q = cm\Delta T$$

уравнение (1) можно переписать в виде:

$$\frac{dT_s}{dt} = -\frac{\alpha}{cm}(T_s - T_0)S \quad (3)$$

где  $c$  и  $m$  удельная теплоемкость и масса капли соответственно.

Поскольку в рассматриваемом случае поверхность соприкосновения меняется во времени - при сжатии жидкости ее форма меняется из шарообразной до пластинки. Следовательно,  $S$  в (2) является функцией от времени  $S = S(t)$ .

Для определения данной зависимости будем использовать следующее предположение. В процессе сжатия между двумя байками движущимися на встречу друг другу с относительной (средней) скоростью  $v$ , капля формы шара с объемом  $V$  приобретает форму диска (за счет эффекта смачивания, например) с радиусом  $R$  и высотой  $h$ , зависящими от времени. Тогда с учетом того, что объем  $V$  сохраняется и  $h(t) = d - vt$ , площадь поверхности соприкосновения, то есть площадь торца диска  $S$  можно записать в следующем виде:

$$S(t) = \frac{V}{h(t)} = \frac{V}{d - vt} \quad (4)$$

где  $d$  – диаметр шара.

Подставляя (4) в (3) и учитывая, что тепло передаются одновременно с двух торцов диска, то есть заменяя  $S$  на  $2S$  получим

$$\frac{dT_s}{dt} = -\frac{\alpha}{cm}(T_s - T_0)\frac{2V}{d - vt} \quad (5)$$

## FUNDAMENTAL SCIENCES

Для решения нам нужно будет найти следующий интеграл

$$I = \int_0^t \frac{d\tau}{d-v\tau} = -\frac{1}{v} \ln\left(\frac{d-vt}{d}\right)$$

Таким образом, для общего решения уравнения (5) получим

$$T_s = \begin{cases} T_0 + (T_{s0} - T_0) e^{-\frac{2\alpha V}{cmv} \ln\left(\frac{d}{d-vt}\right)} & \text{при } t \leq t_0 \\ T_0 + (T_{s1} - T_0) e^{-\frac{2\alpha V t}{cm h_k}} & \text{при } t > t_0 \end{cases}$$

где

$$T_{s1} = T_0 + (T_{s0} - T_0) e^{-\frac{2\alpha V}{cmv} \ln\left(\frac{d}{h_k}\right)},$$

$h_k$  –конечная толщина диска,  $t_0 = (d-h_k)/v$

На рис.2 показаны кривые охлаждения расплава на солнечной печи методом “хлопушки”, при следующих значениях коэффициента теплоотдачи 1-  $\alpha=500$  Вт/(м<sup>2</sup> К), 2-  $\alpha=1000$  Вт/(м<sup>2</sup> К).

Анализ кривых на рис.2 показывает, что скорости охлаждения расплава на солнечной печи методом “хлопушки” составляют порядка 10<sup>4</sup>град/с.

На рис.3 показана кривая охлаждения расплава на солнечной печи методом слива капель жидкости в воду при  $\alpha=1000$  Вт/(м<sup>2</sup> К).

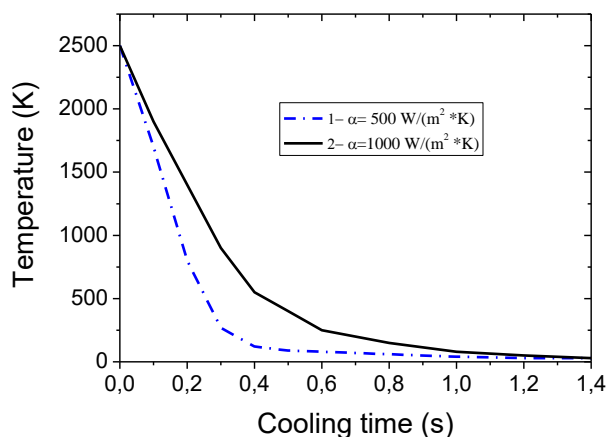


Рис.2. Кривые охлаждения расплава на солнечной печи методом “хлопушки”, при коэффициентах теплоотдачи 1-  $\alpha=500$  Вт/(м<sup>2</sup> К), 2-  $\alpha=1000$  Вт/(м<sup>2</sup> К).

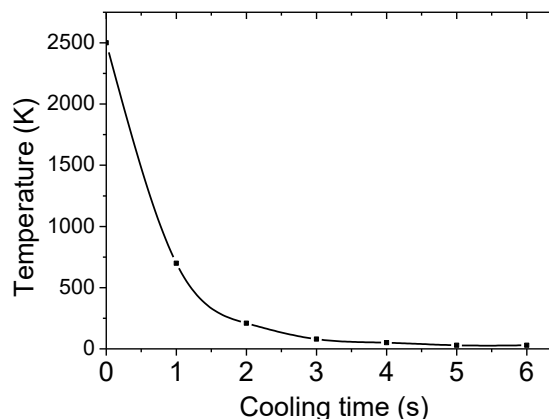


Рис.3. Кривая охлаждения расплава на солнечной печи методом слива капель жидкости в воду при  $\alpha=1000$  Вт/(м<sup>2</sup> К).

Анализ кривой на рис.3 показывает, что скорости охлаждения расплава на солнечной печи методом слива капель жидкости в воду составляют порядка 10<sup>3</sup>град/с.

На рис.4 показана кривая охлаждения расплава на солнечной печи методом охлаждения на поверхности водоохлаждаемой подложки при  $d=0,1$ ,  $\alpha=1000$  Вт/(м<sup>2</sup> К). Ясно, что скорость охлаждения материала (расплава) зависит от массы расплава, температуры воды и скорости

$$d \sim \tau U \sim C \left(\frac{\Delta T^3}{T_m^2}\right) \exp\left(-\frac{E}{kT_{cr}}\right)$$

ее протекания.

Анализ кривой на рис.4 показывает, что скорость охлаждения расплава на солнечной печи методом охлаждения на поверхности водоохлаждаемой подложки составляет порядка 20 град/с. Таким образом, выбирая метод охлаждения расплава можно достигать различные скорости охлаждения: 10<sup>2</sup>; 10<sup>3</sup> и 10<sup>4</sup> град/с.

## FUNDAMENTAL SCIENCES

Для расплавов пироксенов при высоких скоростях охлаждения  $T > 10^3 \text{K/s}$  выполняется условие гомогенного зародышеобразования и роста кристаллических зерен. При этом размер зерна определяется диффузией [7].

где  $\tau$  - среднее время роста зерна, соответствующее времени кристаллизации, с;  $U$  - скорость роста зерна мкм/с;  $C$  - величина, зависящая от скорости охлаждения, температуры и энтальпии плавления, поверхностного натяжения, удельного объема твердой фазы и

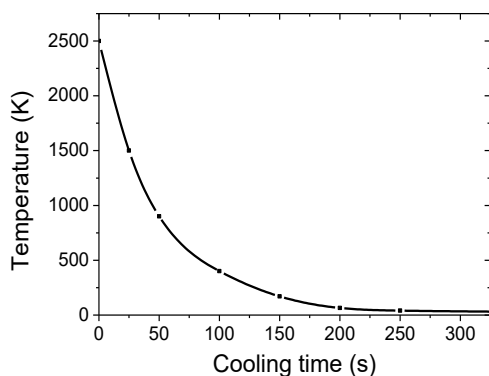


Рис.4. Кривая охлаждения расплава на солнечной печи методом охлаждения на поверхности водоохлаждаемой печи при  $d=0,1$ ,  $\alpha=1000 \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$ .

Дебаевской частоты мкм;  $T_{cr}$  - температура кристаллизации расплава, К;  $\Delta T$  - величина переохлаждения ( $\Delta T = T_m - T_{cr}$ ), К;  $E$  - эффективная энергия активации диффузии, эВ.

На рис.5 показана зависимость размера зерен материала от скорости закалки. Из рис.5 видно, что аппроксимация такой зависимости на максимально высокую скорость закалки позволяет определить размеры кластеров жидкого состояния вещества. Для получения закаленного материала с наноразмерными частицами необходимо охладить расплав со скоростью выше  $10^6 \text{ град/с}$ .

Следует также отметить, что значительный перегрев расплава ведет к увеличению количества жидкой фазы и неравномерности охлаждения с возникновением больших раковин и трещин. Проведенные исследования показывают, что температура перегрева расплава оказывает большое влияние на формирование кристаллической структуры целевого материала.

Возникающие при закалке расплава термические напряжения вызывают процессы локального пластического течения. Это приводит к образованию структур с различной степенью протекания релаксационных процессов и диффузии вакансий к границам зерен, что увеличивает их концентрацию на границах зерен и в прилегающих к ним объемах. Следует отметить, что в процессе быстрой закалки из расплава присутствуют две группы механизмов образования дислокационной структуры: вакансионный, который связан с переползанием дислокаций в условиях пересыщения вакансиями кристаллической решетки, и механизм образования дислокаций в поле внешних напряжений и деформаций сдвига.

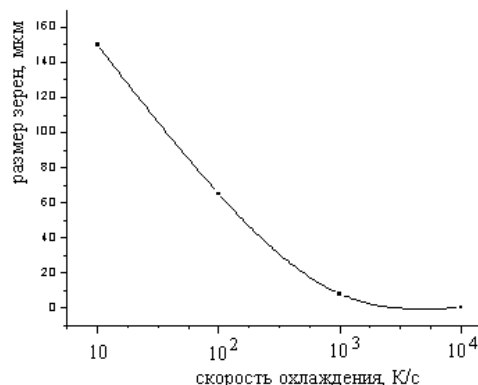


Рис.5. Зависимость размера частиц материала от скорости закалки.

### Выводы

Следовательно, проведено моделирование процессов нагрева и охлаждения материалов (пироксеновых пород) на Большой Солнечной Печи. Показано, что в рамках модели с учетом допущений и начальных условий можно описать процессы нагрева и охлаждения пироксеновых пород под воздействием концентрированного солнечного излучения высокой плотности. Полученные результаты расчета хорошо согласуются с экспериментально наблюдаемыми. Показано, что скорость охлаждения расплава, оказывающая сильное влияние на дисперсность получаемого материала, определяется методом его осуществления. Для получения закаленного материала с наноразмерными частицами необходимо охладить расплав со скоростью выше  $10^6 \text{ град/с}$ .

---

**FUNDAMENTAL SCIENCES**

---

**Список литературы**

- [1]. T.T. Riskiev, M.S. Paizullakhanov, I.G. Atabaev, Sh. Faiziev, Z. Shermatov, The Effects of the Solar Radiant Flux Density on the Properties of Pyroceramic Materials. *Applied Solar Energy*. 2015 v.50, №4, pp.260-264.
- [2]. A. Abdurakhmanov, J. Z.Akhadov. Synthesis of calcium aluminates on the Big Solar Furnace. *Applied Solar Energy*, 2012 v.48, №2, pp.129-131.
- [3]. M.S.Paizullakhanov, I.G.Atabaev, Sh.Faiziev, Z.Shermatov, O.Razhamatov. High-strength glass-ceramic materials synthesized in a large solar furnace. *Applied Solar Energy*. 2015 v.51, №3, pp.202-205.
- [4]. A. Abdurakhmanov, A.A. Kuchkarov, M.A. Mamatkosimov, Z.Z. Akhadov. The optimization of the optical-geometric characteristics of mirror concentrating systems. *Applied Solar Energy* 50 (4), 244-251
- [5]. M.S.Paizullakhanov, Sh.Faiziev, Sh.Nurmatov, Z.Shermatov, Synthesis Features of Barium Titanate in the Field of Concentrated Light Energy. *Applied Solar Energy*. 2015 v.50, №4, pp.260-264.
- [6]. S.I.Klychev, A.Abdurakhmanov, A.A.Kuchkarov. Optical-geometric parameters of a linear Fresnel mirror with flat facets. *Applied Solar Energy* 50 (3), 168-170
- [7]. *В.В.Бражкин, С.В.Попова. Расплавы.4, 97, 1989.*