

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ КВАРЦА ПРИ НАЛИЧИИ НА ЕГО ПОВЕРХНОСТИ МИКРОЧАСТИЦ

NUMERICAL MODELLING OF HEATING BY LASER RADIATION OF QUARTZ IN THE PRESENCE ON ITS SURFACES OF MICROPARTICLES

Д. С. Тимаев

D. S. Timaev

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics

Целью настоящей работы являлось численное моделирование тепловых процессов в оптическом элементе из кварца под воздействием на него непрерывного лазерного излучения достаточно высокой интенсивности, при наличии на его поверхности микрочастиц.

Численное моделирование проводилось в рамках пакета программ «ЛОГОС» [1]. Смоделированы микрочастицы с различными характерными размерами. На основе данных, полученных в расчетах, получен критерий для определения критических размеров микрочастиц и соответствующих им значений потока, приводящих к деформации оптического элемента. Также на основе расчетов был получен критерий допустимой запыленности.

The purpose of the real work was numerical modeling of thermal processes in an optical element of quartz under impact on it of the continuous laser radiation of rather high intensity, in the presence on its surface of microparticles.

Numerical modeling was carried out within software package «LOGOS» [1]. Microparticles with various characteristic sizes are simulated. On the basis of the data obtained in calculations the criterion for determination of the critical sizes of the microparticles and the values of a stream corresponding to them leading to deformation of an optical element is received. Also on the basis of calculations the criterion of admissible dust content was received.

Постановка задачи

Предполагалось, что исследуемый оптический элемент, на который падает лазерное излучение, представляет собой плоскопараллельную пластину, выполненную в форме цилиндра, изготовленную из кварца. Для иллюстрации на рис. 1 представлена геометрия задачи.

Оптическая пластина имела следующие размеры: радиус $R = 6$ см, толщина $L = 1,2$ см. В расчетах использовались теплофизические характеристики кварца, приведенные в [2, 3]:

- плотность $2,203$ г/см³;
- теплоемкость $0,703$ Дж/г/градус;
- коэффициент теплопроводности $0,0138$ Вт/см/градус;

Микрочастицу было решено моделировать в виде окружности заданного радиуса. Такое реше-

ние было принято для упрощения построения расчетной модели и соответствующей ей сетки. Микрочастица располагалась в центре оптического элемента.

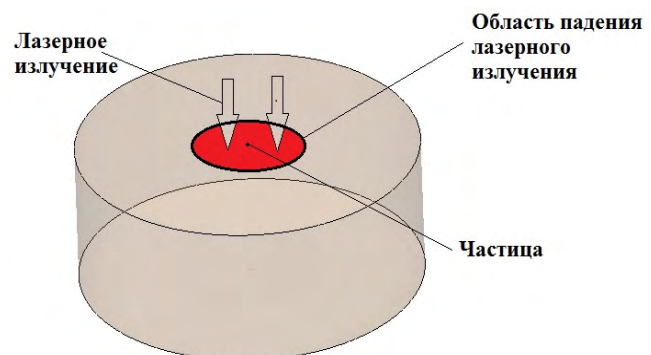


Рис. 1. Геометрическая модель исследуемого образца

Конвективный теплообмен с окружающей средой не учитывался. Объемное поглощение лазерного излучения кварцем Q , задавалось формулой:

$$Q = q \cdot \delta, \quad (1)$$

где $\delta = 0,00001 \text{ см}^{-1}$ – коэффициент поглощения лазерного излучения в стекле, q (Вт/см^2) – плотность падающего теплового потока.

В расчетах необходимо было определить критическую величину q в зависимости от r (размер микрочастицы).

Характерные размеры микрочастиц, остающихся после очистки, или попавших случайным образом составляют порядка от 10 до 200 мкм. Величину q в рамках расчета варьировали в пределах от 1 кВт/см^2 до 10 кВт/см^2 . Считалось, что микрочастица полностью поглощает падающий на нее тепловой поток. Время расчета составляло 100 с.

Расчетная сетка

В силу существенной разности размеров исследуемого образца и моделируемых микрочастиц было необходимо построить соответствующую сетку. В области «пылинки» она должна быть более подробной. Но при этом количество ячеек не должно быть большим, для оптимизации времени расчета нашей задачи. В итоге для моделирования отдельной микрочастицы была построена сетка, состоящая из 4 областей:

- цилиндрическая область с радиусом, соответствующим размеру микрочастицы и высотой $h = 10^{-3}$ м, с размером ячейки $\varepsilon = 10^{-5}$ м;
- цилиндрическая область с радиусом $r = 10^{-3}$ м и высотой $h = 5 \cdot 10^{-3}$ м, с размером ячейки $\varepsilon = 8 \cdot 10^{-5}$ м;
- цилиндрическая область с радиусом $r = 10^{-2}$ м и высотой $h = 5 \cdot 10^{-3}$ м, с размером ячейки $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-4}$ м;
- оставшаяся часть образца с размером ячейки $\varepsilon = 8 \cdot 10^{-4}$ м.

Для построения расчетной сетки использовались неструктурированные сетки, состоящие из 8-узловых шестигранников. На рис. 2 представлен фрагмент расчетной сетки, используемой для теплового расчета в пакете программ «ЛОГОС» [1]. Расчетная сетка включает в себя $\sim 2,2 \cdot 10^6$ ячеек, $\sim 2,3 \cdot 10^6$ узлов и $\sim 6,6 \cdot 10^6$ граней.

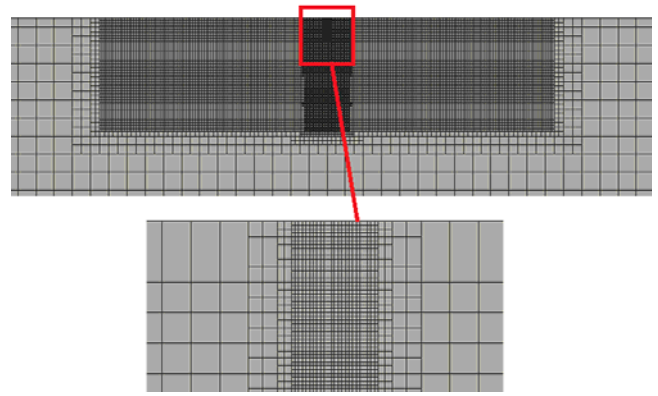


Рис. 2. Фрагмент расчетной сетки

Расчет для отдельной микрочастицы

Как говорилось ранее, микрочастицу мы моделировали в виде окружности с известным радиусом. Для моделирования были выбраны радиусы $r = 50, 75, 100, 150$ и 200 мкм. В рамках задачи мы считали, что коэффициент поглощения такой микрочастицы равен 1. Соответственно на область частицы накладывалось граничное условие тепловой поток. Были смоделированы следующие значения плотности теплового потока от 1 кВт/см^2 до 10 кВт/см^2 . Когда значение температуры на границе пылинки достигает значения температуры плавления, область, где коэффициент поглощения равен единице, начинает расширяться, т. е. площадь падения теплового потока увеличивается. Чтобы учесть данный факт в рамках нашего расчета, на область за вычетом микрочастицы было задано граничное условие тепловой поток в виде следующей формулы:

$$\text{if } (T > T_{\text{пл}}) \text{ do } q = q_f \text{ else } q = 0, \quad (2)$$

где $T_{\text{пл}}$ температура плавления кварца, q_f – плотность теплового потока.

Данное условие на каждом расчетном шаге проверяет значение температуры в центре ячейки. И как только значение больше указанного тепловой поток будет падать на область $r_m + 1$ ячейка, и так далее. Необходимо заметить, что в расчете также учитывалось объемное поглощение лазерного излучения, так как стекло не может полностью пропускать излучение. Данное условие накладывалось на область падения потока при $r_m < r < 2$ см при помощи формулы:

$$\text{if } ((0 < R < 0,02)) \text{ do } Q = Q_v \text{ else } Q = 0, \quad (3)$$

где Q_v – объемный источник энерговыделения.

Область «пылинки» исключалась в силу того, что мы учитываем условие объемного поглощения, задавая падающий тепловой поток на эту область. Все расчеты проводились в пакете программ «ЛОГОС» [1].

Приведем результаты расчета в виде распределения температур по радиусу в плоскости $Z = 0$ (плоскость падения лазерного излучения) для области микрокастички. Начальная точка центр микрокастицы. На рис. 3–4 представлены распределения температур для некоторых вариантов значений r_m и q .

Из рис. 3–4 видно, что распределение температур имеет одинаковый характер для различных вариантов значений r_m и q . С увеличением времени растут лишь значения температур. Распределение тепла в области микрокастицы происходит в виде сферической волны, что согласуется с теорией.

Для определения критического потока для конкретного радиуса микрокастицы нам необходимо знать температуру в точке на границе «пылинки». Также мы можем определить это при помощи расчетов, моделируя различные варианты тепловых потоков. Но это займет большое количества времени. Поэтому нам необходимо попытаться решить численно задачу с некоторыми упрощениями. Очевидно, что искомая температура складывается из двух составляющих:

– Составляющая, обусловленная плотностью теплового потока, падающего на область микрокастицы;

– Составляющая, обусловленная объемным поглощением лазерного излучения.

Для нахождения второй составляющей воспользуемся проделанными нами расчетами и получим значения температур, получаемых за счет

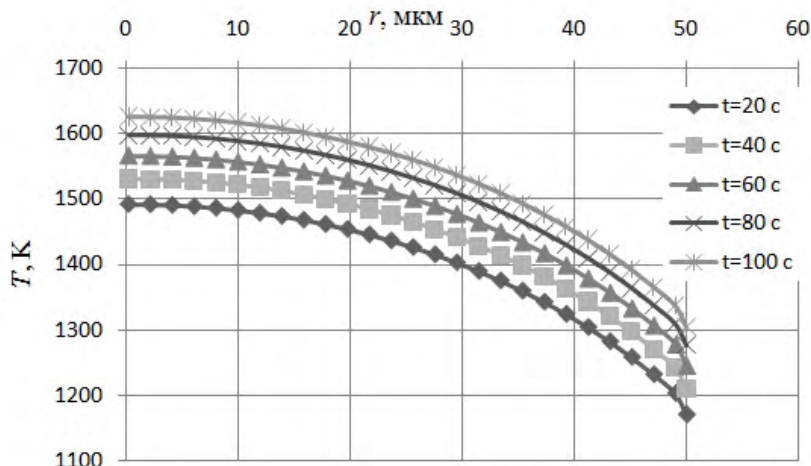


Рис. 3. Распределение температур по радиусу в плоскости $Z = 0$ (плоскость падения лазерного излучения) для области микрокастички при $r_m = 50$ мкм и $q = 3$ кВт/см²

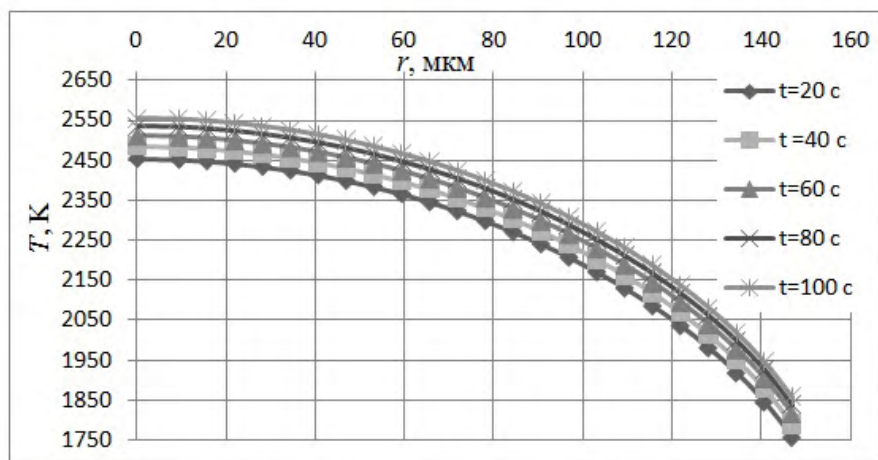


Рис. 4. Распределение температур по радиусу в плоскости $Z = 0$ (плоскость падения лазерного излучения) для области микрокастички при $r_m = 150$ мкм и $q = 2$ кВт/см²

объемного поглощения. И при помощи этих температур найдем усредненный коэффициент $\xi_\delta = 0,61 \text{ см}^2 \cdot \text{Дж}^{-1}$. Тогда вклад от объемного поглощения можно рассчитать следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta T_{\max}^\delta (\text{град}) &= \\ &= 0,61 (\text{см}^3 \cdot \text{Дж}^{-1}) q (\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2}) t (\text{сек}) \delta (\text{см}^{-1}). \end{aligned} \quad (4)$$

Для нахождения первой составляющей необходимо решить следующую задачу теплопроводности: область $z > 0, 0 < r < \infty$, с постоянным тепловым потоком q через поверхность $0 < r < r_0, z = 0$ и нулевым потоком при $r > r_0, z = 0$. Данную постановку можно записать следующим образом:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (5)$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = q, 0 \leq r \leq r_0; 0, r > r_0, \quad (6)$$

где (5) – уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах, (6) – граничное условие второго рода.

Мы рассматриваем стационарный случай, так как нам интересен предельный случай распределения температур. Решение будет иметь следующий вид [4]:

$$T(r) = \frac{r_0 q}{\lambda} \int_0^\infty \frac{1}{\sigma} \exp(-\sigma z) J_0(\sigma r) J_1(\sigma r_0) d\sigma. \quad (7)$$

Тогда суммарный перепад температур в любой точке микрочастицы можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Delta T_{\max}^\delta &= 0,61 q t \delta + \\ &+ \frac{r_0 q}{\lambda} \int_0^\infty \frac{1}{\sigma} \exp(-\sigma z) J_0(\sigma r) J_1(\sigma r_0) d\sigma. \end{aligned} \quad (8)$$

Из (8) можно легко получить критерий для ограничения плотности теплового потока в зависимости от радиуса микрочастицы. Интеграл в этом выражении вычисляется численно, но r подставляется в мкм, r_0 в выражении радиус микрочастицы соответственно. Тогда для частицы размером 50 мкм, получим значение критического потока $q_{\text{кр}} = 6,8 \text{ кВт/см}^2$ в результате расчета мы получили значение $q_{\text{кр}} = 7 \text{ кВт/см}^2$. Стоит отметить, что если коэффициент поверхностного поглощения микрочастицы будет равен не единице, а другому числу, тогда во втором слагаемом формулы (8) появится дополнительный множитель

ξ_f – коэффициент поверхностного поглощения и тогда формула для критического потока примет окончательный вид:

$$q_{\text{кр}} = \frac{\Delta T_{\text{пл}}}{\xi_\delta t \delta + \frac{r_0 \xi_f}{\lambda} \int_0^\infty \frac{1}{\sigma} \exp(-\sigma z) J_0(\sigma r) J_1(\sigma r_0) d\sigma}. \quad (9)$$

Критерий запыленности стекла

Ранее было получено выражение для определения критического потока для отдельной пылинки. В этом пункте будет представлен критерий допустимой запыленности стекла, на которое падает непрерывное излучение лазера.

Введем величину del , которая есть среднее расстояние между пылинками. В результате моделирования было получено, что при $del \gg r_0$ максимальный перепад температур достигается непосредственно в области пылинки, а температура в области между пылинками при данном условии существенно меньше. Соответственно при условии, когда $del \geq r_0$, будем считать, что характерный радиус пылинки $r = r_0 + del$. Для подтверждения данного предположения была смоделирована задача с 5 пылинками $r_0 = 50 \text{ мкм}$ и расстоянием между ними $del = 500 \text{ мкм}$, на область частичек накладывалось граничное условие тепловой поток плотностью 6 кВт/см^2 . Полученные результаты приведены на рис. 5.

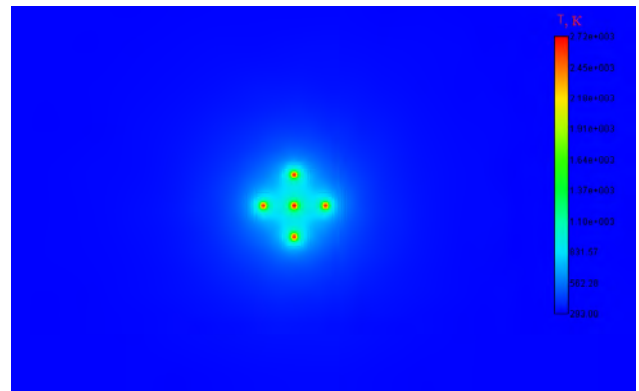


Рис. 5. Распределение температур в образце с 5 пылинками на поверхности стекла

Из рисунка видно, что наше предположение верно, и максимальный перепад температур приходится на область пылинок. В области же между частицами значения температур гораздо ниже, и являются допустимыми для полноценного функционирования линзы.

Для получения критерия введем следующие величины, характеризующие запыленность:

- C ($n_{\text{пылинок}}/\text{см}^2$), концентрация пыли на единицу площади;
- ε_f (безразмерный), коэффициент поверхностного заполнения пылью.

Критерий будет основан на формуле (9) с некоторыми упрощениями. Будет взято среднее значение интеграла

$$\int_0^{\infty} \frac{1}{\sigma} \exp(-\sigma z) J_0(\sigma r) J_1(\sigma r_0) d\sigma,$$

которое составляет 0,82. Обозначим данную величину, как ξ_λ . Введем связь между C и ε_f :

$$\begin{aligned} \varepsilon_f &= \frac{S_{\text{пыли}}}{S_{\text{пов.пад.потока}}} = \\ &= \frac{C \pi \langle r \rangle^2 S_{\text{пов.пад.потока}}}{S_{\text{пов.пад.потока}}} = C \pi \langle r \rangle^2, \end{aligned} \quad (10)$$

где $S_{\text{пов.пад.потока}}$ – площадь поверхности падения потока, $\langle r \rangle$ – средний радиус пылинки в рассматриваемой области.

Тогда можно получить, что $\langle r \rangle$ равен:

$$\langle r \rangle = \sqrt{\frac{\varepsilon_f}{C \pi}}. \quad (11)$$

Подставив данное $\langle r \rangle$ вместо r_0 в выражение (13), получим критерий для запыленности.

$$C = \frac{(q \xi_\lambda \xi_f)^2 \varepsilon_f}{(\Delta T_{\text{пл}} - q \xi_\delta t \delta)^2 \lambda^2 \pi}. \quad (12)$$

При помощи данного критерия можно вычислить значение концентрации пыли или коэффициент поверхностного заполнения при заданных значениях теплового потока и перепада температур. А также получить значение критического теплового потока для заданной концентрации пыли:

$$q_{\text{кр}} = \frac{\Delta T_{\text{пл}}}{\xi_\delta t \delta + \frac{\langle r \rangle \xi_f \xi_\lambda}{\lambda}}. \quad (13)$$

Для наглядности данного критерия приведем зависимость критического потока $q_{\text{кр}}$ от коэффициента поверхностного заполнения пылью ε_f . Концентрацию пыли C будем считать постоянной равной $100 \text{ 1}/\text{см}^2$. ξ_f также, как ранее считаем постоянным равным единице. А ε_f проварьируем от 0,0001 до 0,5. Тогда получим следующую зависимость, представленную на рис. 6.

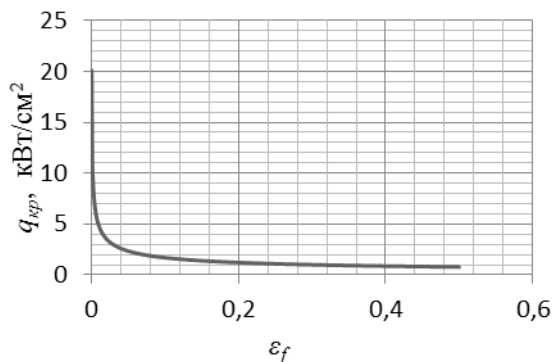


Рис. 6. Зависимость критического потока $q_{\text{кр}}$ от коэффициента поверхностного заполнения пылью ε_f

Из рис. 6 следует, что при увеличении количества пыли на поверхности ОЭ величина критического потока, приводящего к деформации образца, уменьшается. Это объясняется увеличением среднего радиуса пылинки с ростом коэффициента поверхностного заполнения пылью ε_f при постоянной концентрации пыли C .

Расчет для отдельной микрочастицы с учетом фазового перехода

В случае, когда на частичку падает критический для текущего размера поток, площадь области с коэффициентом поверхностного поглощения больше 0 начинает постепенно увеличиваться. Вследствие этого растут температуры, и их значения достигают порядка $T_{\text{пл}}$, а затем и $T_{\text{исп}}$. Тогда линза начинает деформироваться. Смоделируем процесс фазового перехода в пакете программ «ЛОГОС». На данный момент в программе реализован лишь один последовательный фазовый переход, поэтому реализуем процесс сублимации кварцевого стекла. Но мы можем смоделировать процесс плавления искусственным образом, задав свойства кварца в зависимости от температуры в следующем виде:

$$\begin{aligned} &\text{if } (T \leq T_{\text{пл}}) \text{ do } C(\lambda) = \\ &= C_{\text{тв.ф.}}(\lambda_{\text{тв.ф.}}) \text{ else } C(\lambda) = C_{\text{ж.ф.}}(\lambda_{\text{ж.ф.}}), \end{aligned} \quad (14)$$

где $T_{\text{пл}}$ температура плавления кварца, $C_{\text{тв.ф.}}(\lambda_{\text{тв.ф.}})$ – теплофизические свойства кристаллической фазы, $C_{\text{ж.ф.}}(\lambda_{\text{ж.ф.}})$ – теплофизические свойства жидкой фазы.

Чтобы смоделировать тот факт, что при фазовом переходе часть сетки, как бы улетучивается в виде газа, в параметрах фазового перехода зададим коэффициент теплопроводности стремящимся к бесконечности, а коэффициент теплоемкости

стремящимся к нулю. Температура фазового перехода $T_{\text{фп}} = 4500$ К, удельная теплота фазового перехода $\mu = 1750$ кДж/кг [5]. Были рассмотрены различные варианты размера микрочастицы и значений плотности теплового потока. Были получены следующие результаты, представленные на рис. 7–8.

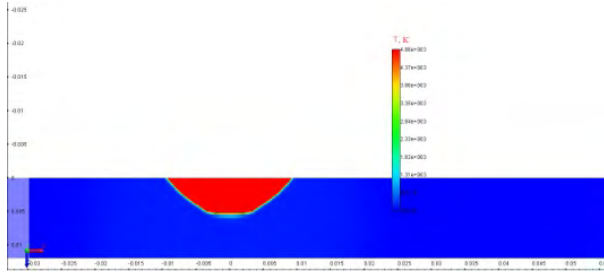


Рис. 7. Распределение температур с учетом фазового перехода при $r_m = 50$ мкм, $q = 8$ кВт/см² на момент времени $t = 24,7$ с

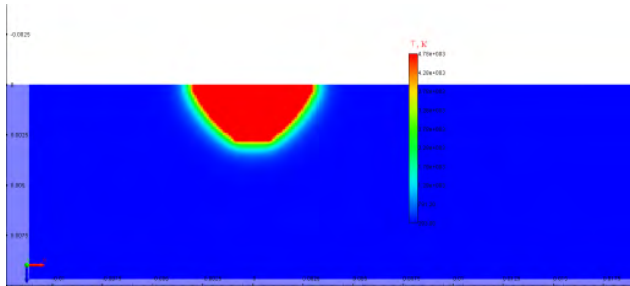


Рис. 8. Распределение температур с учетом фазового перехода при $r_m = 100$ мкм, $q = 4$ кВт/см² на момент времени $t = 3,6$ с

Из рис. 7–8 видно, что происходит деформация исследуемого образца, а именно проплавление. Для различных входных параметров r_m , q характер проплавленной области схож, и представляет собой усеченный конус. Выполнив данный расчет, мы убедились, что даже небольшая пылинка размером не больше толщины человеческого волоса способна привести к необратимым деформациям ОЭ при попадании на него излучения непрерывного лазера.

Заключение

В рамках пакета программ «ЛОГОС» проведено численное моделирование влияния нагрева оптического элемента лазерным излучением при наличии на его поверхности микрочастиц. Использование пакета программ «ЛОГОС» позволяет оперативно провести расчетное моделирование в случае сложной геометрии задачи.

Предполагалось, что исследуемый оптический элемент, на который падает непрерывное лазерное излучение, представляет собой плоскопараллельную пластину из плавленного кварца, выполненную в форме цилиндра. На поверхности пластины находилась микрочастица.

Полученные результаты можно сформулировать следующим образом:

- получены поля температур для различных вариантов размеров микрочастицы и значений плотности теплового потока.

- получен критерий для определения критического теплового потока в зависимости от радиуса микрочастицы:

$$q_{\text{кр}} = \frac{\Delta T_{\text{пл}}}{\xi_{\delta} t \delta + \frac{r_0 \xi_f}{\lambda} \int_0^{\infty} \frac{1}{\sigma} \exp(-\sigma z) J_0(\sigma r) J_1(\sigma r_0) d\sigma}$$

- получен критерий для определения допустимой концентрации пыли на ОЭ при прохождении через него непрерывного лазерного излучения:

$$C = \frac{(q \xi_{\lambda} \xi_f)^2 \varepsilon_f}{(\Delta T_{\text{пл}} - q \xi_{\delta} t \delta)^2 \lambda^2 \pi}$$

- определен характер деформирования ОЭ в результате фазового перехода.

Полученные результаты являются инженерной оценкой и не могут дать гарантий от возможных деформаций оптических элементов и объектов в сложных условиях длительной эксплуатации.

Исследования по влиянию наличия «пылинок» и других микрочастиц должно найти отражение в разработке нормативных документов, устанавливающих допустимую величину и концентрацию пыли на поверхностях оптических элементов, работающих в системах непрерывных лазеров.

Список литературы

1. Пакет программ «ЛОГОС», версия 5. Свидетельство № 2017612306 от 20.02.2017.
2. Green A. E. Thermoelastic stresses in initially stressed bodies – Proc. Roy. Soc., 1962.
3. Тимошенко С. П., Гудьер. Теория упругости. – М.: Наука, 1975. 576 с.
4. Карслоу Г., Егер Д. «Теплопроводность твердых тел». – М.: Наука, 1964.
5. Кутателадзе С. С., Боришанский В. М. «Справочник по теплопередаче». – М.: Государственное энергетическое издательство», 1958.