

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

*Кафедра компьютерной физики и метаматериалов
на базе Саратовского филиала
Института радиотехники и электроники
имени В.А. Котельникова РАН*

**3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ
НАГРЕВАНИЯ ПЛАСТИНКИ ЛАЗЕРНЫМ ЛУЧОМ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ ПРОГРАММИРОВАНИЯ
FREEFEM++**

АВТОРЕФЕРАТ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ
(БАКАЛАВРСКОЙ) РАБОТЫ
студента 4 курса 432 группы
направления 03.03.02 «Физика» физического факультета
Бахтина Дмитрия Александровича

Научный руководитель
к.ф.-м.н. доцент В. И. Цой

Заведующий кафедрой
д.ф.-м.н. профессор В.М. Аникин

Саратов
2018

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Цель работы: Освоение начал FreeFem++ на примере 3d моделирования нагрева образца лазерным лучом методом конечных элементов в системе, и разработка краткого введения в FreeFem++. С этой целью в работе выделены последовательные этапы решения краевой задачи с помощью ff++ в соответствующих разделах работы.

Задачи:

Произвести 3D моделирование нагрева образца лазерным лучом в программе FreeFem++.

Научная новизна работы:

Актуальность и новизны настоящей работы связана с попыткой создать краткое руководство, позволяющее быстро сделать первые шаги по моделированию физических полей. Обучение состоит в выполнении простых программ с соответствующими комментариями.

Структура и объем квалификационной работы. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения и списка литературы, изложенных на 45 страницах.

ОСНОВЫ СОДЕРЖАНИЯ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определены цели и задачи работы, определена практическая значимость.

В главе 1 был изложен процесс установки и запуск системы FreeFem++.

В главе 2 было рассмотрено общие свойства конечных элементов, построение 2D и 3D конечно-элементных сеток.

```
real gorizonta = 200; // строка 1
real vertikal=100; // строка 2
border niz(t=0,gorizonta) { x=t; y=0 ;label=1;}; // строка 3
border pravo(t=0,vertikal) { x=gorizonta; y=t ;label=2;}; // строка 4
border verh(t=gorizonta,0) { x=t; y=vertikal ;label=3;}; // строка 5
border levo(t=vertikal,0){ x=0; y=t; label=4;}; // строка 6
mesh th = buildmesh( niz(10)+pravo(5)+verh(10)+levo(5)); // строка 7
fespace Vh (th,P1); // строка 8
Vh [uu,vv]; // строка 9
plot(th); // строка 10
```

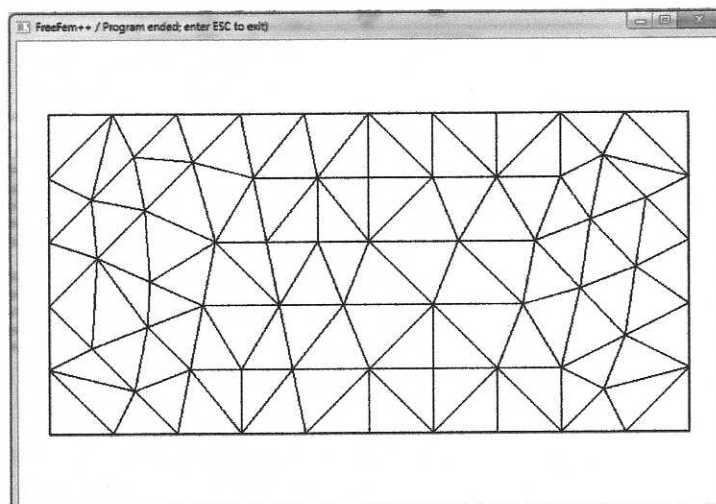


Рис.2.1. Конечно-элементная сетка, построенная по программе 1.

```
//Программа 2. Генерация конечных элементов для 3D пластины
load "msh3" // строка 1
load "medit" // строка 2
int nn=4; // строка 3
real gorizontal = 200; // строка 4
real vertikal=100; // строка 5
border niz(t=0,gorizontal) { x=t; y=0 ;label=1;}; // строка 6
border pravo(t=0,vertikal) { x=gorizontal; y=t ;label=2;}; // строка 7
border verh(t=gorizontal,0) { x=t; y=vertikal ;label=3;}; // строка 8
border levo(t=vertikal,0){ x=0; y=t; label=4;}; // строка 9
mesh Th2 = buildmesh(niz(20)+pravo(10)+verh(20)+levo(10)); // строка 10
fespace Vh2(Th2,P2); // строка 11
Vh2 ux, uz, p2; // строка 12
int[int] rup=[0,5], rdown=[0,6], rmid=[1,1,2,2,3,3,4,4]; // строка 13
func zmin= 0; funczmax= 20; // строка 14
mesh3Th=buildlayers(Th2,nn, // строка 15
coef= 1, // строка 16
zbound=[zmin,zmax], // строка 17
reffacemid=rmid, // строка 18
reffaceup = rup, // строка 19
reffacelow = rdown); // строка 20
medit("plate",Th); // строка 21
plot(Th,cmm="plate"); // строка 22
```

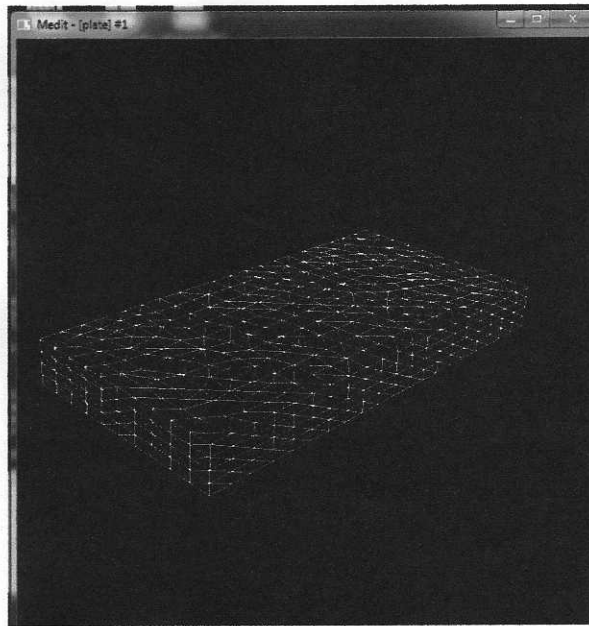


Рис.2.3. Конечно-элементная сетка, построенная по программе 2

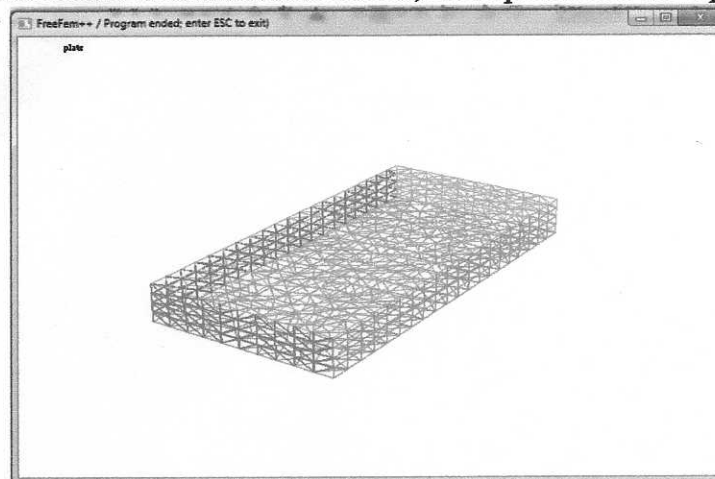


Рис.2.4. Конечно-элементная сетка, построенная по программе 2

В главе 3 были построены конечно-элементные функции в 2D и 3D областях.

Построения конечно-элементных функций в 2D области и их визуализация.

```
real gorizontal = 200; // строка 1
```

```
real vertikal=100; // строка 2
```

```
border niz(t=0,gorizontal) { x=t; y=0 ;label=1;}; // строка 3
```

```
border pravo(t=0,vertikal) { x=gorizontal; y=t ;label=2;}; // строка 4
```

```
border verh(t=gorizontal,0) { x=t; y=vertikal ;label=3;}; // строка 5
```

```
border levo(t=vertikal,0){ x=0; y=t; label=4;}; // строка 6
```

```
mesh th = buildmesh( niz(50)+pravo(25)+verh(50)+levo(25)); // строка 7
```

```

fespace Vh(th,P1); // строка 8
real x1=gorizontal/2; // строка 9
real y1=vertikal/2; // строка 10
real width=25; // строка 11
func f=exp((-x-x1)^2-(y-y1)^2)/width^2); // строка 12
Vh uu=f; // строка 13
plot (th,wait=1); // строка 14
plot(uu,wait=1,nbiso=20,value=1, fill=1); // строка 15

```

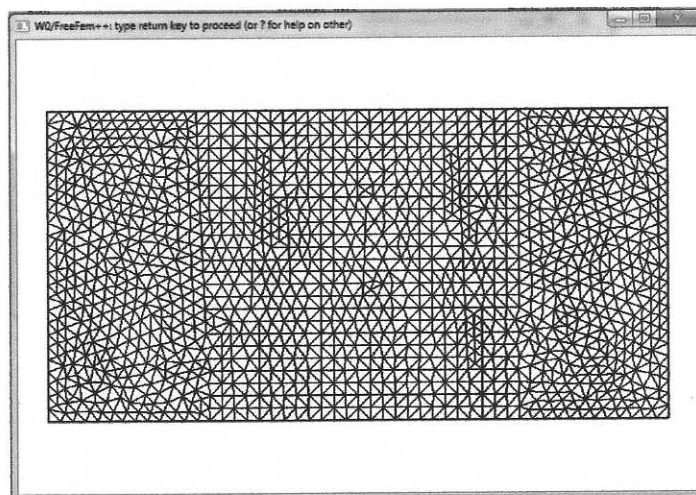


Рис.3.1. Конечно-элементная сетка, построенная по программе 5.

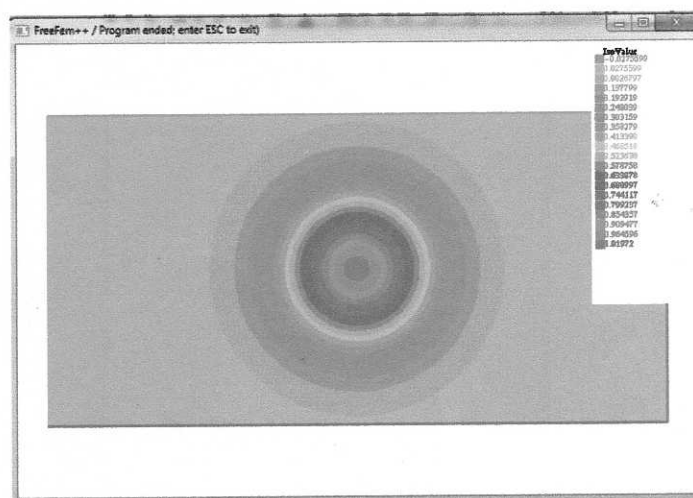


Рис.3.2. Визуализация поля.

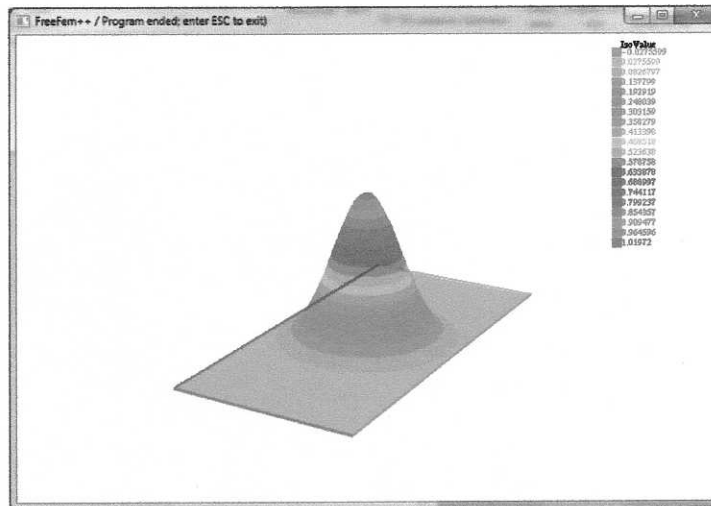


Рис. 3.3. Визуализация 2d поля в виде поверхности на 3d графике.

Программа построения конечно-элементных функций в 3D области и их визуализация.

load "msh3"// строка 1

load "medit"// строка 2

int nn=10; // строка 3

real gorizontal = 200; // строка 4

real vertikal=100; // строка 5

border niz(t=0,gorizontal) { x=t; y=0 ;label=1;}; // строка 6

border pravo(t=0,vertikal) { x=gorizontal; y=t ;label=2;}; // строка 7

border verh(t=gorizontal,0) { x=t; y=vertikal ;label=3;}; // строка 8

border levo(t=vertikal,0){ x=0; y=t; label=4;}; //строка 9

mesh Th2 = buildmesh(niz(30)+pravo(15)+verh(30)+levo(15)); // строка 10

fespace Vh2(Th2,P2); //строка 11

int[int] rup=[0,5], rdown=[0,6], rmid=[1,1,2,2,3,3,4,4]; // строка 12

func zmin= 0; func zmax= 50; // строка 13

mesh3 Th3=buildlayers(Th2,nn, // строка 14

coef= 1, // строка 15

```

zbound=[zmin,zmax], // строка 16
reffacemid=rmid, // строка 17
reffaceup = rup, // строка 18
reffacelow = rdown); // строка 19
fespace Vh3(Th3,P2); // строка 20
real vysota=zmax-zmin; // строка 21
real x1=gorizontal/2; // строка 22
real y1=vertikal/2; // строка 23
real z1=vysota/2; // строка 24
real width=25; // строка 25
func pp=exp(-(x-x1)^2-(y-y1)^2-(z-z1)^2)/width^2); // строка 26
Vh3 uu=pp; // строка 27
Vh2 ucut=pp(x,y,z1); // строка 28
real [int] colorhsv = [5./6.,1,1,4./6.,1,1,3./6.,1,1,2./6.,1,1,1./6.,1,1,0,1,1]; // строка
29
plot(Th3,wait=1); // строка 30
plot(uu,wait=1,nbiso=20,value=1, fill=1,hsv=colorhsv); // строка 31
plot(ucut,wait=1,nbiso=20,value=1, fill=1, hsv=colorhsv); // строка 32

```

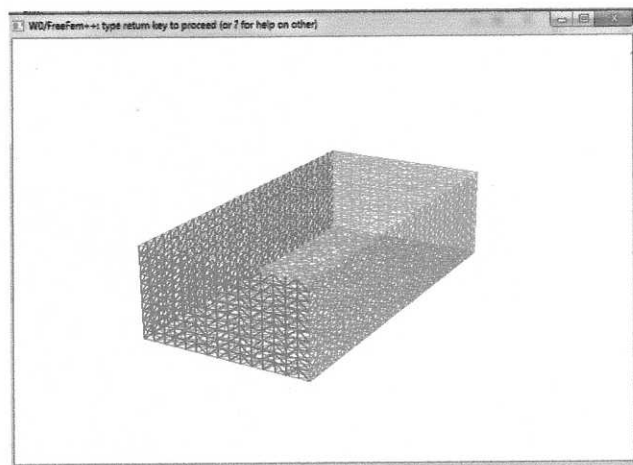


Рис. 3.14. Конечно-элементная сетка.

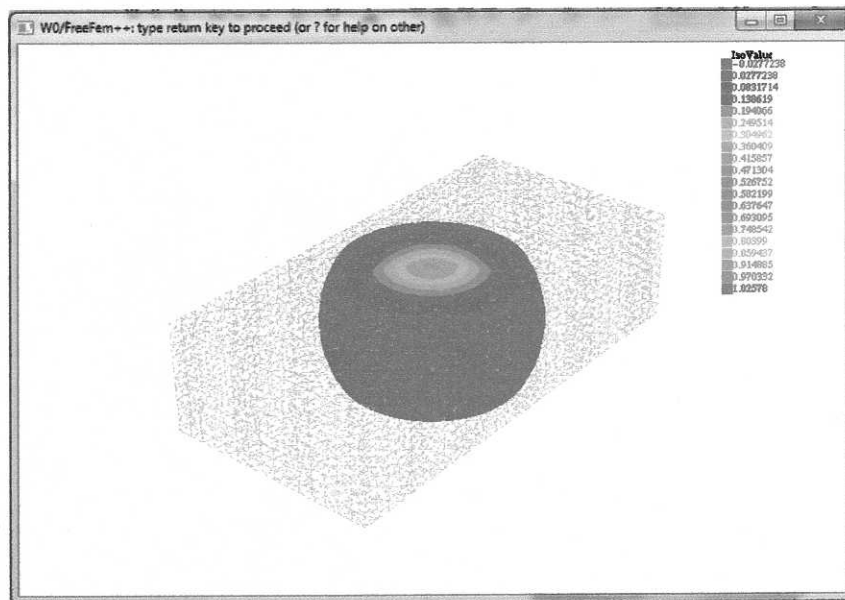


Рис. 3.15. Визуализация поля.

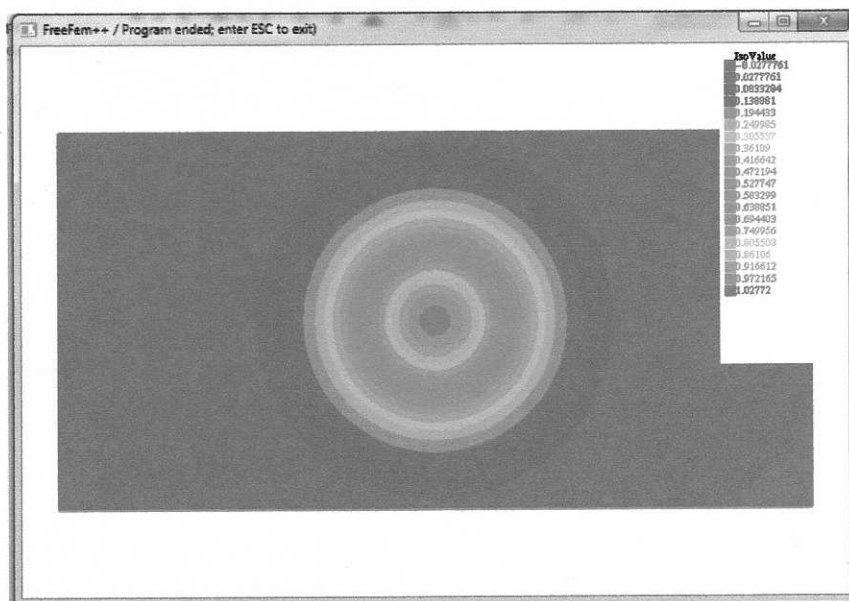


Рис. 3.16. Визуализация поля рисунка 15 в сечении.

В главе 4 кратко изложена идея метода Галеркина и его формулировка применительно к методу конечных элементов. Наиболее популярным из других методов конечных элементов является метод Галеркина, являющийся частной формой метода невязок. Именно этот метод используется в пакете FreeFem++.

В главе 5 происходит определения температуры в образце, нагреваемом лазерным лучом. Моделирование температурного поля в образце в

зависимости от мощности лазерного пучка позволяет определить мощность, которая необходима для лазерной обработки, либо для обеспечения безопасного теплового режима, при котором не нарушается рабочее состояние образца. Для этих целей достаточно решить уравнение теплопроводности, когда источником тепла является поглощение электромагнитного поля луча, проникшего в объем образца, а температура на не облучаемых поверхностях образца равна температуре окружающей среды. Примем входные данные, аналогичные данным, использованным в примере приложения к инсталлятору ff++ [2]. Отличием нашего решения является то, что оно выполнено на трехмерной сетке и позволяет рассматривать различные геометрии облучения, тогда как в документации ff++ использована лишь двумерная задача, позволяющая рассматривать только осесимметричное облучение. Исходный код приведен в программе 8.

Входные данные программы:

Длина пластинки 200 мкм

Ширина пластинки 150 мкм

Толщина пластинки 60 мкм

Коэффициент теплопроводности $1.5e-4$ Вт/К/мкм

Радиус гауссова пучка лазера 2 мкм

Коэффициент отражения кремния 0.55

Ширина запрещенной зоны кремния 1.12 эВ

Энергия фотона лазера 1.49 эВ (длина волны $\lambda = 1.24/1.49 = 0.83$ мкм)

Коэффициент поглощения 0.2

X координата центра лазерного луча

Y координата центра лазерного луча

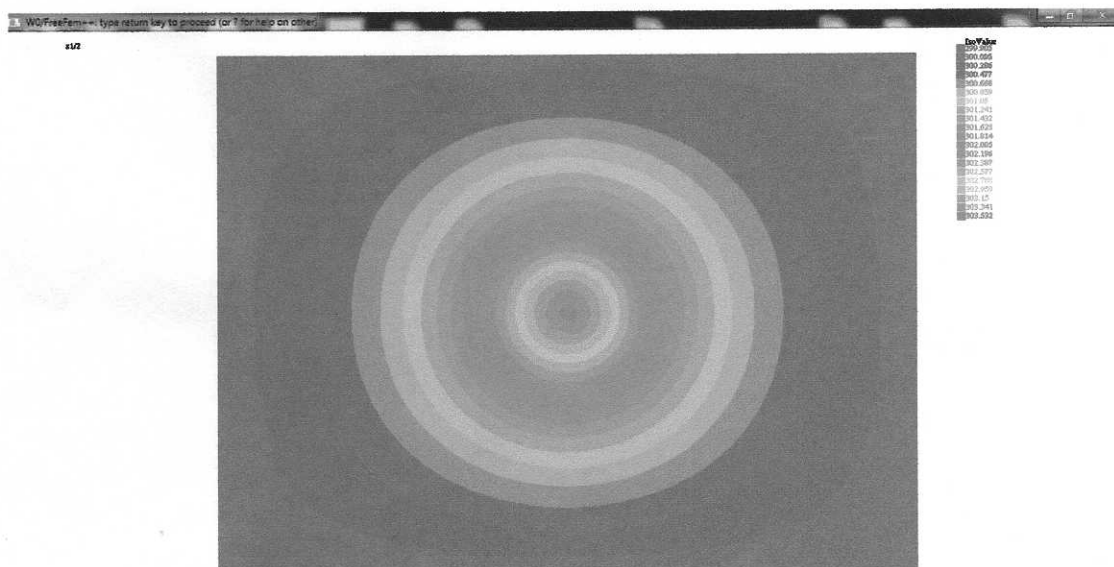


Рис. 5.3. 2D сечение поля рисунка 5.1.

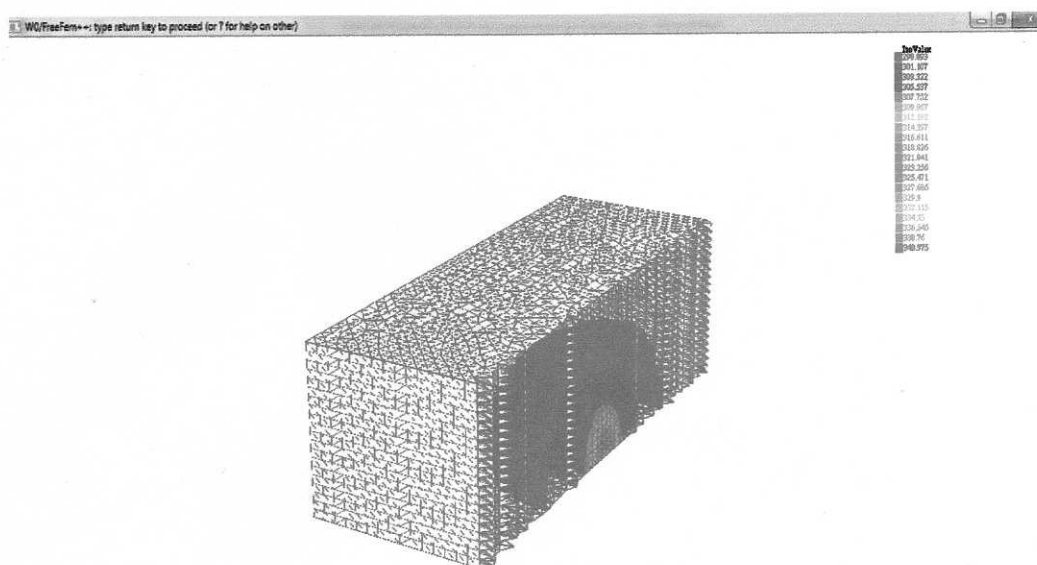


Рис. 5.4. Первоначальная 3D визуализация поля рисунка 5.1 в разрезе.

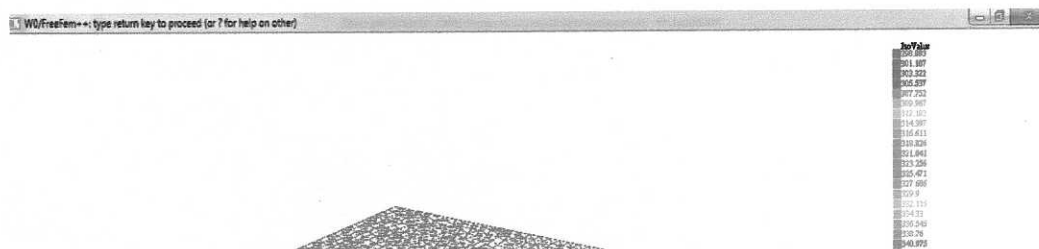


Рис. 5.5. 3D визуализация поля рисунка 5.1 в разрезе с другого ракурса.

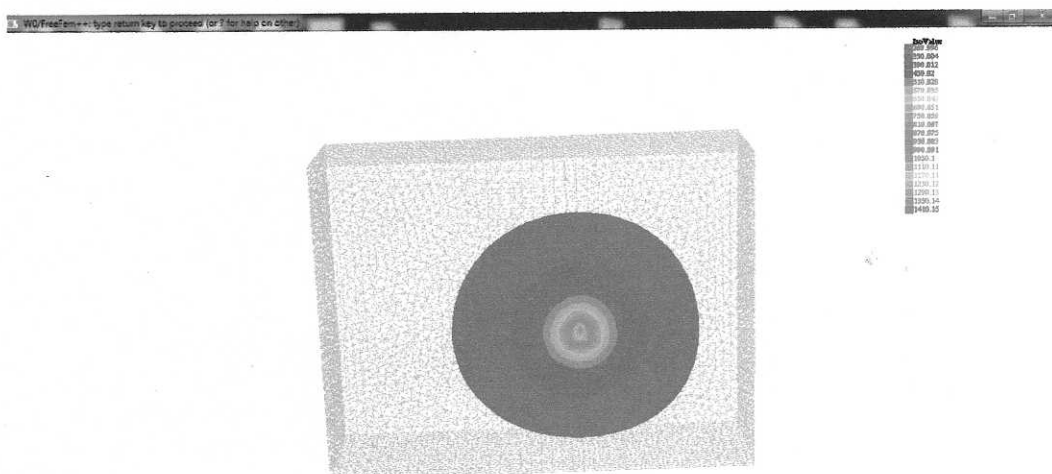


Рис. 5.6. Визуализация поля рисунка при изменении интенсивности и точки падения лазерного луча.

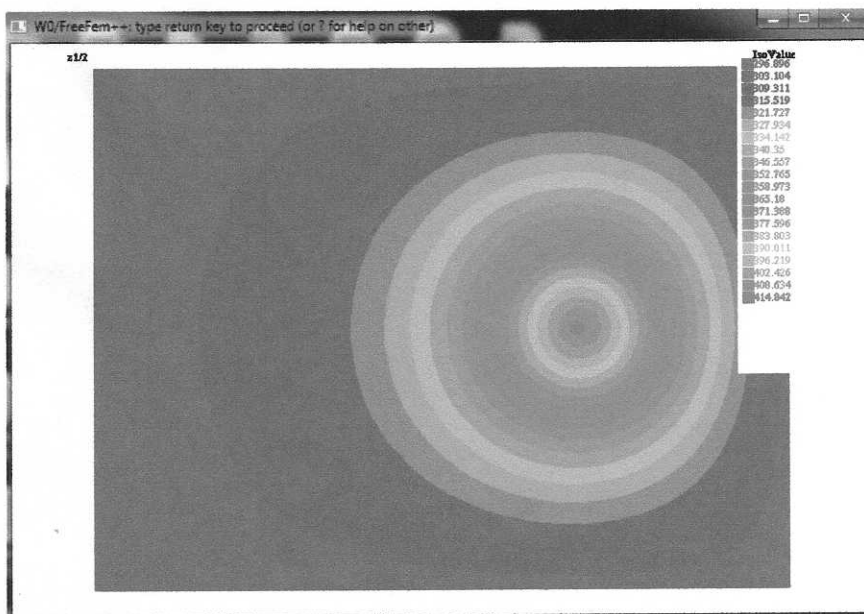


Рис. 5.7. Визуализация поля рисунка 5.6 в разрезе.

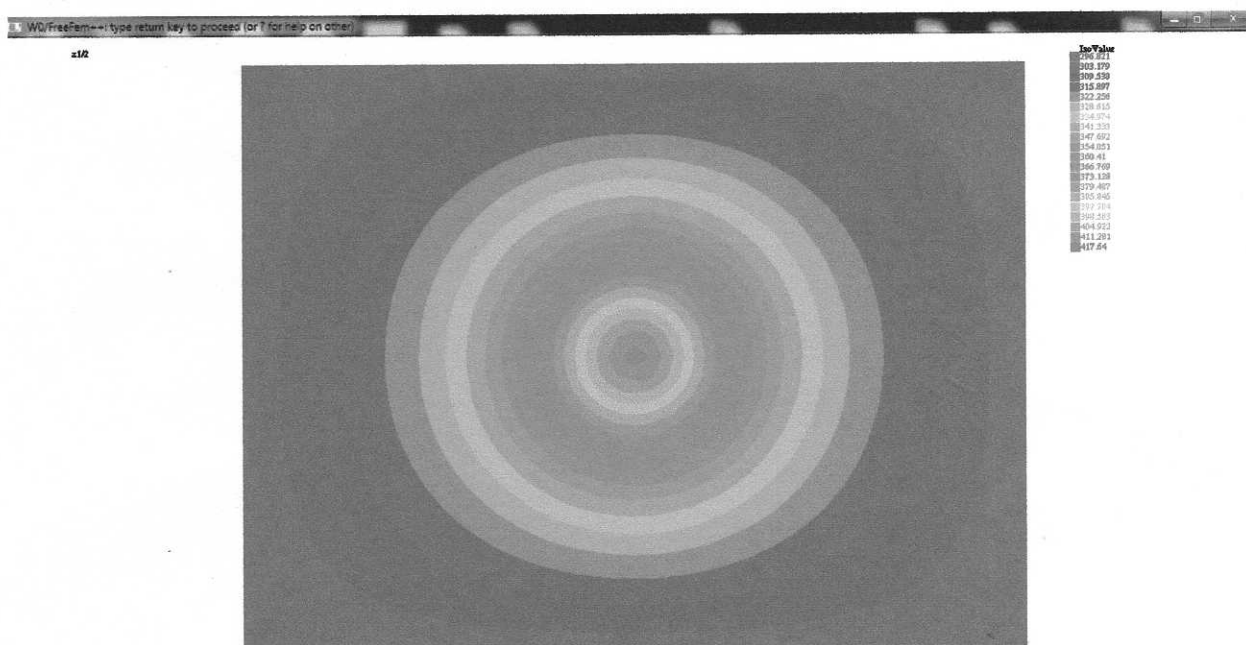


Рис. 5.8. Визуализация поля в разрезе при падении лазерного луча в центр пластины при интенсивности лазера ($realI0=33e-1$).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Результаты расчетов показаны на рисунках 5.1-5.8. Как видно из рисунков 5.1-5.5, при выбранных входных данных, приведенных в тексте программы, температура в нагреваемом лазером образце не превышает 600С. Это означает, что в этом случае, тепловое воздействие не нарушает заметно

тепловой режим в образце и происходящие в нем физические процессы не подвержены значительному изменению.

Если изменить интенсивность лазера (real I0=33e-1), то температура лазерного луча будет очень близка к температуре плавления кремния [6]. Это показано на Рис. 5.8. Кроме интенсивности, можно поменять точку падения лазерного луча (real (xO=(length*0.5) +20; realyO=(width*0.5) +7;). Это показано на Рис. 5.6.

В данной работе сделана попытка создать краткое руководство, позволяющее быстро сделать первые шаги по моделированию физических полей. Обучение состоит в выполнении простых программ с соответствующими комментариями. Первый этап включает построение двумерных и трехмерных сеток конечных элементов и визуализацию определенных на этих сетках полей. На втором этапе иллюстрируется моделирование физических полей на примере нагревания образца лазерным лучом. Следует заметить, что эта задача является 3d-обобщением двумерной задачи, содержащейся в примерах, сопровождающих документацию к FreeFem++. Таким образом, имеется возможность начать сразу с моделирования 3d полей.

В приложение 1 приведены некоторые полезные параметры plot.

В приложение 2 использован вывод уравнения теплопроводности из учебника [7]. Есть и несколько другие подходы к уравнению теплопроводности, например, в пособиях [8-9].

В приложение 3 использовано описание гауссова пучка лазера из учебника [10]. Во многих практически важных случаях амплитуда напряженности поля плавно изменяется по поперечному сечению пучка. Такой пучок можно получить, например, в результате прохождения плоской волны через пластинку с изменяющимся от точки к точке коэффициентом пропускания. Особенно важен случай гауссовых пучков, для которых амплитуда напряженности поля максимальна на оси пучка и экспоненциально уменьшается к краям в соответствии с гладкой функцией Гаусса. Если выбрать ось z по направлению пучка, то в плоскости волнового фронта напряженность такого поля описывается выражением

$$E(x,y) = E_0 \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{w_0^2}\right)$$

Список используемой литературы

1. Д. Норри, Ж. де Фриз. Введение в метод конечных элементов. – М: Мир, 1981. 256 с.
2. F. Hecht. Freefem++. – Paris: Universite' Pierre et Marie Curie, Third Edition, Version 3.56-2. p.418 - <http://www.freefem.org/ff++>.
3. Y. Deleuze. FreeFem++, a PDEs solver: Basic Tutorial. – Paris: Sorbonne Universite', 2013. p.70.
4. O. Pantz. An Introduction to FreeFem++. – Paris: Universite' Pierre et Marie Curie, 2011. p.62.
5. М. Ю. Жуков. Пакет конечных элементов FreeFem++ / Е.В. Ширяева. – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2010. 78 с.
6. Википедия [Электронный ресурс] : свободная энциклопедия / текст доступен по лицензии Creative Commons Attribution-ShareAlike ; Wikimedia Foundation, Inc, некоммерческой организации. Электрон, дан. (1471834 статей, 5 656 986 страниц, 209 622 загруженных файлов). Wikipedia®, 2018- URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Кремний> (дата обращения: 11.05.2018). Загл. с экрана. Последнее изменение страницы: 8 мая 2018 в 19:36. Яз. рус.
7. Д. В. Сивухин. Общий курс физики. Термодинамика и молекулярная физика. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. 544 с.
8. А.Б. Мазо. Основы теории и методы расчета теплопередачи. Казань: - Казанский университет, 2013. 145 с.
9. А.Г. Коротких. Теплопроводность материалов. Томск: изд. Томского политехнического университета, 2011. 97 с.
10. Е. И. Бутиков. Оптика. СПб.: Невский диалект, 2003. 481 с